



מדינת ישראל  
המשרד לאיכות הסביבה

אגף מניעת רעש וקרינה

ד"ר יולי קלר

# רעש מכבישים



## עקרונות, מדידות ושיטות חיזוי

שלום עם הסביבה



המשרד לאיכות הסביבה  
وزارة جودة البيئة  
Ministry of Environment



מדינת ישראל  
המשרד לאיכות הסביבה  
האגף למניעת רעש וקרינה

# רעש מכבישים

## עקרונות, מדידות ושיטות חיזוי



ד"ר יולי קלר

# הקדמה

תודתי לדייר סטילאן גלברג, ראש אגף מניעת רעש וקרינה במשרד לאיכות הסביבה, על תרומתו הגדולה בעריכת הספר ובהכנת הפרק על תכנות חיזוי רעש התחבורה.

# התוכנית סיכומי עבודה

4	מבוא	
5	1. גל הקול ומפלס הרעש	
11	2. מונחים בסיסיים בתכנון דרכים	
11	2.1 דרכים בין-עירוניות ועירוניות - תיאור והגדרות	
15	2.2 מאפייני תנועת התחבורה	
20	2.3 מודלים של זרימת תנועה	
20	2.3.1 מודל ליניארי של חיזוי תחבורה	
22	2.3.2 מודל "מרחק התגובה"	
24	2.3.3 מודל "מרחק העצירה"	
27	3. מפלסים להערכת רעש תחבורה	
27	3.1 מפלסים סטטיסטיים להערכת רעש התחבורה	
27	3.2 מפלס הרעש שווה ערך, $Leq$	
28	3.3 מפלס הרעש $Ldn$	
28	3.4 מפלס הרעש $LNP$	
31	4. רעש מכלי רכב	
31	4.1 השפעת המהירות הסיבובית של המנוע ברכב	
33	4.2 מהירות הנסיעה כגורם עיקרי לרעש מרכב נע	
39	5. מאפייני רעש תחבורה בדרכים עירוניות	
45	6. מאפייני רעש תחבורה בדרכים בין-עירוניות	
47	7. השפעות סביבתיות על התפשטות רעש התחבורה	
47	7.1 השפעת שיפוע הדרך	
48	7.2 השפעת חיפוי הקרקע	
50	7.3 השפעת תנאים אקלימיים על התפשטות רעש התחבורה	
51	8. תקינה אקוסטית לרעש תחבורה	
55	9. תכנות מחשב לחיזוי רעש תחבורה	
55	9.1 בסיס עיוני לחיזוי רעש התחבורה באמצעות תכנת STAMINA 2	
57	9.2 בסיס עיוני לחיזוי רעש תחבורה באמצעות תכנת TNM	
58	9.3 חיזוי הפחתת רעש התחבורה באמצעות מתרסים אקוסטיים	
61	10. חיזוי רעש מדרכים בין-עירוניות	
61	10.1 חיזוי רעש מדרך קיימת	
62	10.2 חיזוי רעש מדרך חדשה	
63	11. מדידות רעש רקע מדרכים	
63	11.1 מדידות רעש תחבורה מדרך קיימת	
64	11.2 מדידות רעש רקע קיים לפני סלילת דרכים חדשות	
65	12. אמצעים להפחתת רעש תחבורה	
65	12.1 המרחק כאמצעי להפחתת רעש	
65	12.2 הפחתת רעש באמצעות צמחייה	
66	12.3 אספלט שקט להפחתת רעש תחבורה	
66	12.4 מחסומים להגנה בפני רעש תחבורה	
74	12.4.1 קירות להפחתת רעש תחבורה	
74	12.4.2 סוללות עפר	
79	12.4.3 מתרסים אקוסטיים בולעים	
79	12.5 שימוש במנהרות ובשיקוע הדרך	
81	12.6 המעטפת החיצונית כאמצעי להפחתת רעש התחבורה	
91	13. מראי מקום	

התשתית התחברתית משמשת בסיס לפיתוח כלכלי של מדינות מתפתחות ומפותחות בכלל ושל ישראל בפרט. תשתית תחברתית מפותחת חשובה במיוחד בישראל כדי לאפשר נגישות יעילה מכל רחבי הארץ למרכזים התעשייתיים, שהתפתחו סביב הערים הגדולות: ירושלים, תל אביב, חיפה, באר שבע ועוד.

בשנים האחרונות חלה התפתחות מהירה במערכת הדרכים הבין-עירונית, כאשר במקביל לסלילת כבישים חדשים בוצעה הרחבה של כבישים קיימים, במיוחד במרכז הארץ.

המחלפים הרבים שנבנו בדרכים בין-עירוניות מרכזיות פתרו בעיות פקקי תחבורה וקיצרו במידה ניכרת את משכי הנסיעה בין הערים.

התחבורה וכלי הרכב היוו מאז ומתמיד מקור לרעש סביבתי חזק. בעיה זו חריפה במיוחד בישראל, שבה מחסור בשטחים לבנייה גורם להתקרבות מתמדת של אזורי מגורים אל דרכים בין-עירוניות ולבניית בתי מגורים על שפת הדרכים העירוניות.

רמות הרעש הנוצר מעורקי תחבורה עירוניים ובין-עירוניים מגיעות לערכים גבוהים מאוד בשעות היום והלילה. רעש התחבורה גורם לע תים להפרעות שינה קשות, וזאת למרות העמידה בדרישות המשרד לאיכות הסביבה.

המלחמה ברעש התחבורה חייבת להתנהל בכמה מישורים בעת ובעונה אחת: תכנון אקוסטי סביבתי של שכונות מגורים בכלל, ושל בית מגורים בודד בפרט, והפחתת רעש בדרך התקדמותו אל בית המגורים.

כושר הפחתת הרעש על ידי מתרסים מוגבל, ואינו מבטיח את האקלים האקוסטי ברמה הנדרשת בדירה עם חלון פתוח, במיוחד בשעות הלילה.

רמות הרעש הנגרמות בתוך דירות עם חלונות פתוחים עולות בדרך כלל במידה משמעותית מעל רמות הרעש הנדרשות להבטחת תנאי פעילות האדם.

את בעיית הרעשים הסביבתיים, ובמיוחד את בעיית רעש התחבורה, ניתן לפתור באופן יעיל על ידי הניצול של המעטפת החיצונית האטומה של בית המגורים.

את הבידוד האקוסטי של המעטפת החיצונית של בניינים קובע הבידוד האקוסטי של החלונות. תכנון נכון יאפשר השגת רמת בידוד אקוסטי נדרשת של המעטפת החיצונית.

נקודת התורפה היחידה בסגירת החלון בבית המגורים נובעת מהצורך באורור חלל הדירה. כיום קיימים חלונות אקוסטיים המאפשרים אורור חללי הדירה תוך הפחתת הרעש החיצוני בשיעור הנדרש, אשר אינו נופל מהבידוד האקוסטי של חלון סגור.

בשנת 1999 סיימה הוועדה הבין-משרדית את עבודתה בהכנת ההצעה לתקנות למניעת רעש מדרכים.

מטרת המדריך היא להקנות ידע לאנשי איכות הסביבה ולמהנדסים מתכננים בנושא חיזוי רעש התחבורה והפחתתו.

# 1. גל הקול ומפלס הרעש

גלים באוויר נוצרים עקב היווצרות שינויי לחץ הנגרמים מתנודות מכניות של מכוונות, מתנועת מכוונות וכו'. גלים באוויר שאליהם מגיב האדם באמצעות מערכת השמיעה שלו, נקראים גלי קול. באקוסטיקה מתייחסים ל"אדם הממוצע" - ממצאי ניתוח סטטיסטי של מאפייני שמיעה ותגובות של קבוצות ביקורת גדולות של אנשים עם שמיעה תקינה, המבצעים פעילויות שונות בתנאי רעש שונים.

תחומי השמע של האדם הם כדלקמן:

1. תדירות השמע -

$$f = (20 \div 20000) \text{ Hz}$$

2. עצמת השמע -

$$I = (10^{-12} \div 1) \text{ wt/m}^2$$

קולות ורעשים הם אותות מורכבים הבנויים מגלים בעצמות שונות ובתדירויות שונות.

גלי קול הם אוסף חלקיקי אוויר, הנעים בהתאם לתדירות ולעצמה של הכוח המניע, ולכן ניתן לתאר אותם כעין גוף בעל מאפיינים הנדסיים ואנרגטיים כאחד.

למאפיינים ההנדסיים של גלי קול שייכים:

1. מהירות התקדמות באוויר -

$$C = C_o \sqrt{\left[1 + \frac{t}{273}\right]}$$

כאשר:

$C_o$  - מהירות התקדמות גלי קול באוויר בטמפרטורה של  $20^{\circ} \text{C}$ , m/sec

$t$  - טמפרטורה של  $^{\circ} \text{K}$

$$C_o = 334 \text{ m/sec}$$

2.  $\lambda$  - אורך הגל, m

3.  $f$  - תדירות, Hz

שלושת המאפיינים האלו קשורים באמצעות הנוסחה:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

למאפיינים האנרגטיים של גלי קול שייכים:

1. הספק אקוסטי  $W$ ,  $wt$

2. עצמת הקול,  $I$ ,  $wt/m^2$

כאשר:  $S$  - שטח הפנים

$$I = \frac{W}{S}, \frac{wt}{m^2}$$

3. לחץ הקול -

$$p = \sqrt{IpC}, N/m^2$$

כאשר:

$\rho$  - צפיפות האוויר,  $kg/m^3$

$C$  - מהירות התקדמות גלי קול באוויר,  $m/sec$

את התכונות של גלי הקול מבטאים באמצעות התלות בין המאפיינים ההנדסיים והתדירות (ספקטרום הקול):

$$W = F1(f) \quad I = F2(f), \quad p = F3(f)$$

מפלס הקול מוגדר באמצעות הנוסחה:

$$L = 10 \lg \frac{I}{I_0} = 20 \lg \frac{p}{p_0}, dB$$

$$L_w = 10 \lg \frac{W}{W_0}, dB$$

ערכי הבסיס של המאפיינים האנרגטיים השונים נלקחו מסף השמיעה של האדם הממוצע בתדירות של  $1,000 Hz$ :

$$W_0 = 10^{-12} wt \quad I_0 = 10^{-12} wt/m^2 \quad P_0 = 2 \cdot 10^{-5} N/m^2$$

על פי היחס של מידות מקור הקול לבין מרחק המדידה ניתן לאפיין את צורת ההתקדמות של גלי הקול מהמקור אל הקולט ולחשב את מפלסי הקול במרחק:

$$L_2 = L_1 \mp k \lg \frac{r_2}{r_1}, dB$$

כאשר:

$L_1$  - מפלס הקול הנוצר במרחק של  $r_1$  מהמקור

$L_2$  - מפלס הקול הנקבע במרחק של  $r_2$  מהמקור

$k$  - מקדם בהתאם לסוג מקור הקול

"-" - התרחקות מהמקור

"+" - התקרבות למקור

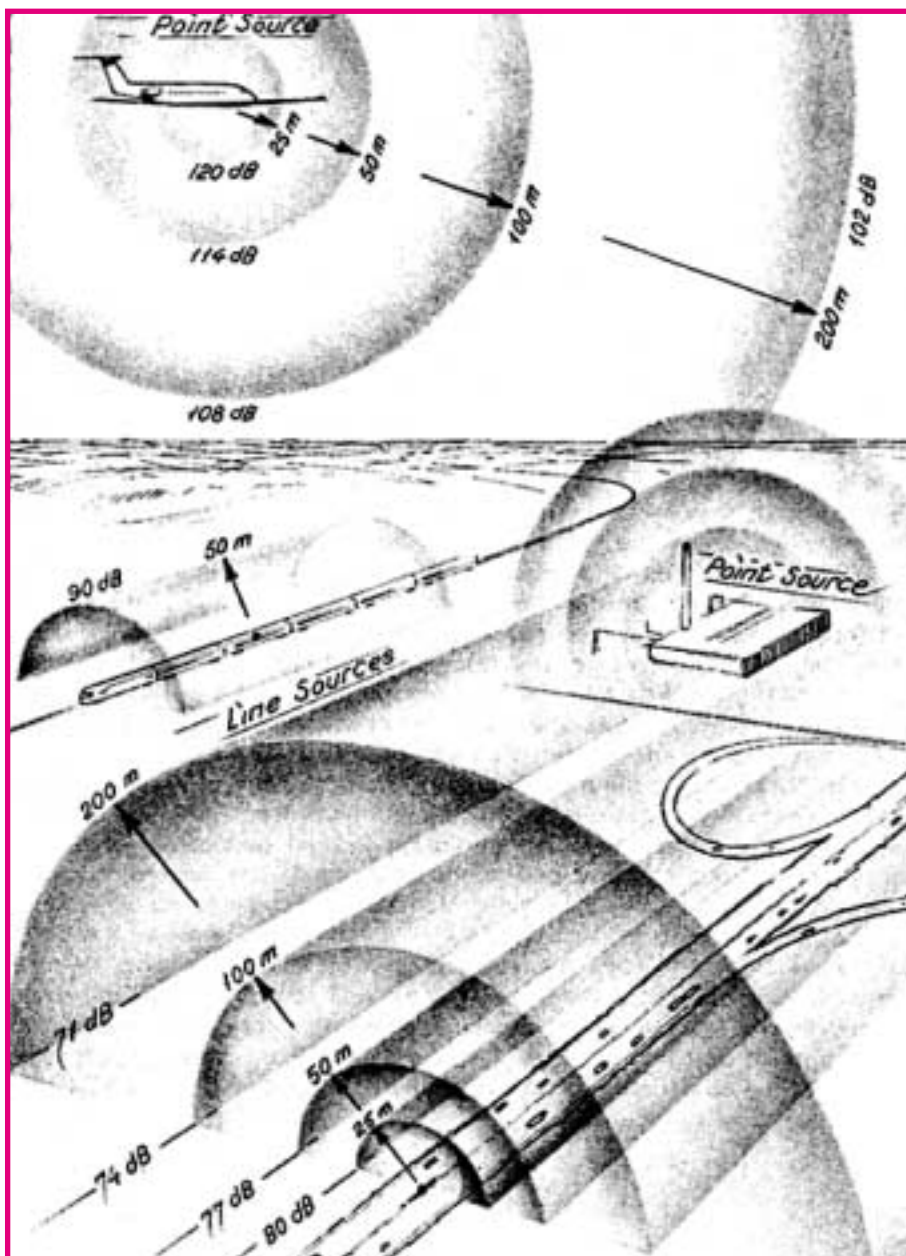
$k=0$  - מקור קול מרחבי - כל מידותיו של המקור גדולות בהרבה מאורך הגל המוקרן והמרחק. מפלס הקול אינו משתנה עם המרחק.

$k=10$  - מקור קול קווי - אחת המידות של המקור גדולה בהרבה מאורך הגל המוקרן וממרחק המדידה. דוגמה אופיינית - עורקי תחבורה - כביש תחבורה - המפלס משתנה ב-3 dB לכל הכפלת המרחק.

$k=20$  - מקור קול ניקודי - כל מידותיו של המקור קטנות בהרבה מאורך הגל המוקרן ו/או מרחק המדידה - המפלס משתנה ב-6 dB לכל הכפלת המרחק. דוגמה - רכב בודד הנבדק במרחק של כ-15 מ'.

תרשים מס' 1.1 מתאר את צורת ההתקדמות של גלים ממקורות קול.

תרשים 1.1 - התפשטות גלים ממקורות קול



את מפלס הקול הכולל הנוצר על ידי כמה מקורות בנקודת הייחוס, כאשר כל אחד ממקורות אלו יוצר בנקודה זו מפלס  $L_i$ , ניתן לחשב לפי הנוסחה:

$$L_{\Sigma} = 10 \lg \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10}, dB$$

כאשר כל המקורות גורמים בנקודת הייחוס למפלסים זהים, המפלס הכולל יחושב לפי הנוסחה:

$$L_{\Sigma} = L + 10 \lg n, dB$$

כאשר  $n$  - כמה מקורות קול

האדם מגיב באופן שונה לקולות בתדירויות שונות ובעצמות שונות המתבטאות בהרגשת "חוזק" הקול - ראה עקומים שווי חוזק בתרשים מס' 1.2.

קווי שווה חוזק מאפיינים מצב שבו האדם הצביע על הרגשת חוזק קול זהה.

בתרשים ניתן לראות שצורתם של עקומים שווי חוזק משתנה גם עם הגדלת מפלס הקול, וכאשר מגיעים לעצמות גבוהות, תהיה הרגשת החוזק זהה כמעט בכל תחום תדירויות השמע.

כדי לאפשר בדיקת קולות באמצעות מכשירי מדידה, בהתאם לתכונות אוזן האדם, נכללים במכשירי מדידה מסננים מיוחדים בעלי מאפייני היענות בתדרים דומים לקווי שווה חוזק של האוזן - ראה תרשים מס' 1.3.

1. מסנן A מותאם לעקומים שווי חוזק בתחום המפלסים dB (55 ÷ 0) בתדירות של 1,000 Hz - מפלסי הקול מסומנים ב-dB(A).

2. מסנן B מותאם לעקומים שווי חוזק בתחום המפלסים dB (75 ÷ 55) בתדירות של 1,000 Hz - מפלסי הקול מסומנים ב-dB(B).

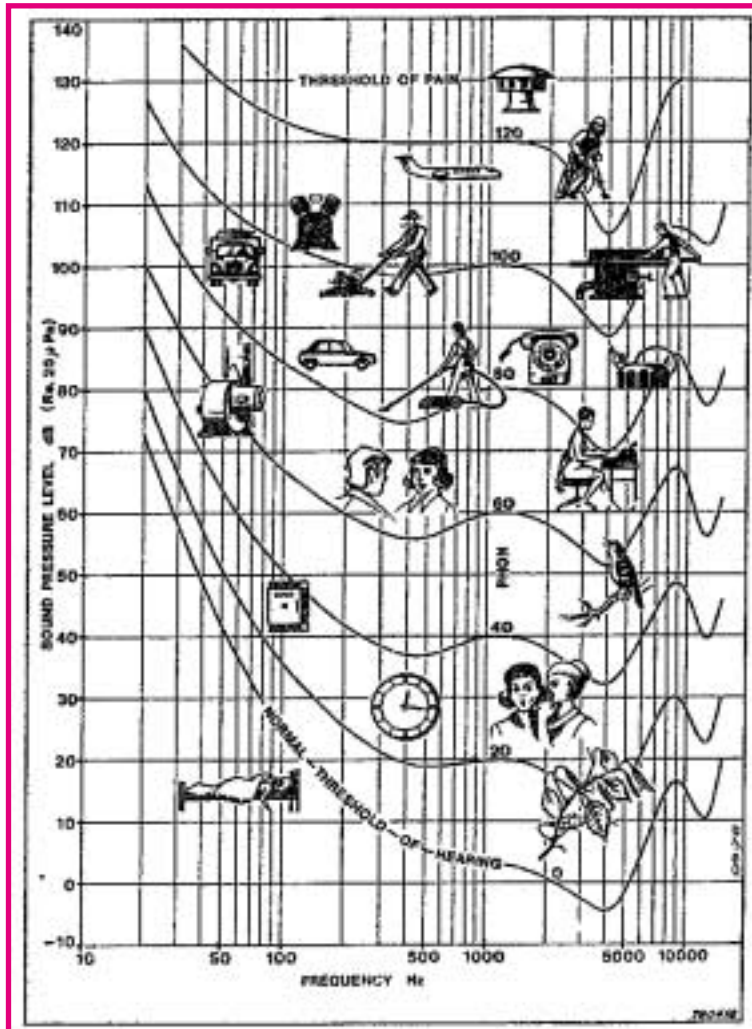
3. מסנן C מותאם לעקומים שווי חוזק בתחום המפלסים מעל dB(A) 75 בתדירות של 1,000 Hz - מפלסי הקול מסומנים ב-dB(C).

בדרך כלל, כאשר מודדים קול באמצעות שלושת המסננים מקבלים את התלות הבאה:

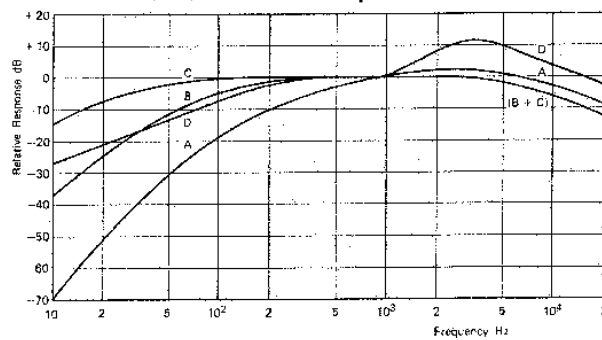
$$dB(A) \ll dB(B) \ll dB(C)$$

מחקרים [1] מצביעים על כך שקיימת התאמה גבוהה מאוד בין דרגת ההשפעה של רעש תחבורה על האדם לבין מפלסי רעש התחבורה הנמדדים בערכי dB(A).

תרשים 1.2 - עקומים שווי חוזק



תרשים 1.3 - עקומי הערכה A, B, C ו-D



# 2. מונחים בסיסיים בתכנון דרכים

## 2.1 דרכים בין-עירוניות ועירוניות – תיאור והגדרות

הנדסת תעבורה (Traffic Engineering) עוסקת בתכנון ובתפעול תנועת כלי רכב בדרכים בין-עירוניות ועירוניות, בצמתים ובמחלפים.

הרחובות העירוניים והדרכים הבין-עירוניות משמשים לשתי מטרות עיקריות:

1. ניידות - לאפשר לאנשים ולסחורות להגיע ליעדיהם.
2. נגישות - לאפשר כניסה ויציאה לשימושי קרקע, מגורים, מסחר, תעשייה, בלויים וכו'.

בהתאם להנחיות התכנון, סיווג דרכים עירוניות ובין-עירונית נעשה כדלקמן [2]:

1. דרכים בין-עירוניות:

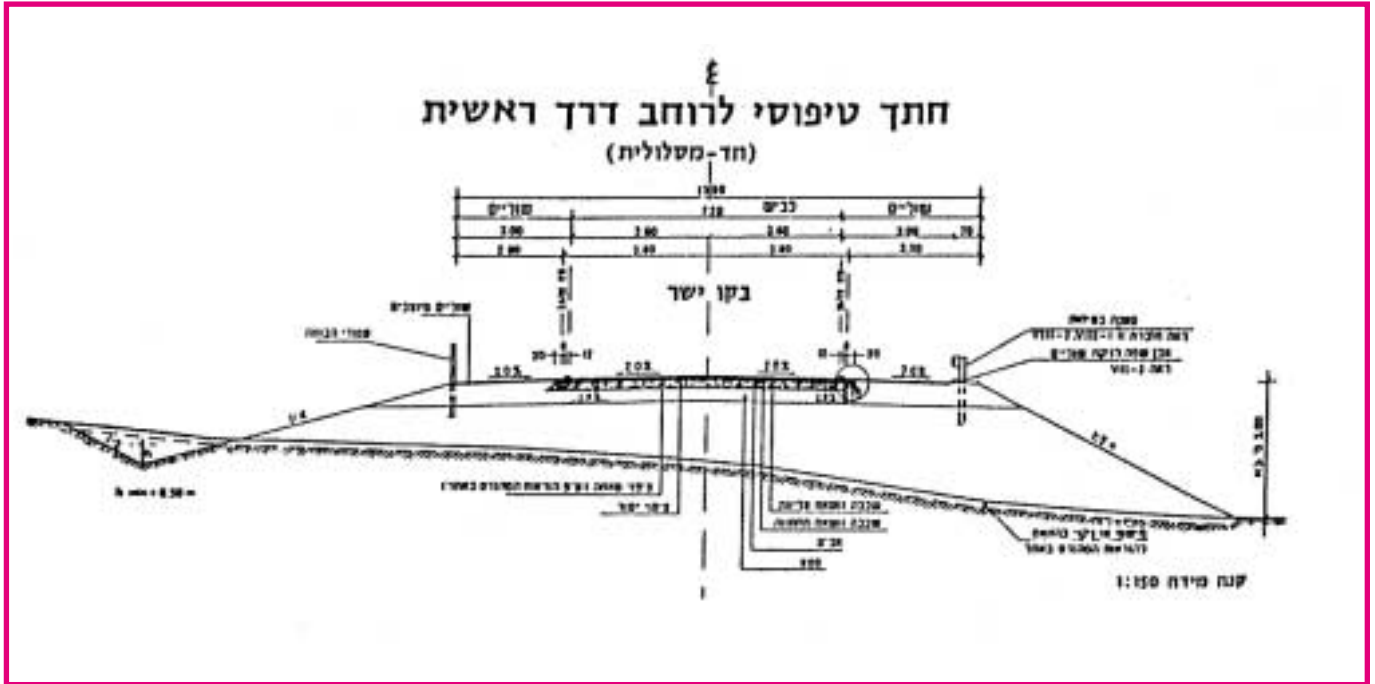
- 1.1 דרך מהירה - בעלת שני מסלולים מופרדים ללא צמתים וללא גישה לשימושי קרקע.
- 1.2 דרך פרברית מהירה - מתקשרת לדרכים בין-עירוניות ולרחובות אורכיים.
- 1.3 דרך ראשית - דומה לדרך מהירה, אולם כוללת צמתים וגישה לשימושי קרקע. רוחב זכות הדרך - 80 מ'.
- 1.4 דרך אזורית - אוספת תנועה מיישובים וכוללת בדרך כלל שני נתיבים. רוחב הזכות של דרך זו - 60 מ'.
- 1.5 דרך מקומית - מקשרת בין יישובים קטנים לדרך אזורית וכוללת שני נתיבים.

2. דרכים עירוניות:

- 2.1 דרך פרברית מהירה - עוברת מחוץ לשכונות ורבעים ומעבירה את התנועה אל צירי תנועה בין-עירוניים.
- 2.2 רחוב עורקי - ממוקם בשוליים של שכונות ורבעים, מחבר ביניהם ומפזר תנועה מדרכים בין-עירוניות אל רשת הרחובות המאספים.
- 2.3 רחוב מאסף - רחוב מרכזי שכונתי המחבר שכונות ברובע, ומעביר תנועה מהרחוב העורקי אל הרחובות המקומיים או אל שימושי קרקע בשכונות.
- 2.4 רחוב מקומי - רחוב העובר בתוך השכונה.

בתרשימים 2.1 ו-2.2 מוצגים חתכים אופייניים של דרך בין-עירונית ורחוב עירוני.

תרשים 2.1 - חתך רוחב טיפוסי של דרך ראשית

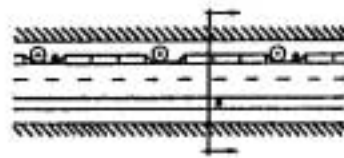


תרשים 2.2 - חתך רוחב של רחוב עירוני

סאטף דו-נתיבי עם חניה בצד אחד ופס ירק בצד אחד



רוחב זכות הדרך	מאפיינים		מרום	מרום חנייה לפדולת	סגל נתיבי חנייה	פס ירק	רוחב מדרכה מועדי
	חניה אוטובוס	חניה סתמית					
16.0	לא	לא	2.5	2.25	6.75	2.0	2.5
17.0	כן		3.0				
18.25	לא	כן	3.5	2.50			3.5
19.25	נחליל		4.0				4.0



\* נקטע יצר בלבד, לא כולל הרחבה בעקומים.

הדרך הבין-עירונית כוללת בדרך כלל את המרכיבים הבאים:

1. נתיבי נסיעה ברוחב 3.66 מ' כל אחד, עם שיפוע של 2% לניקוז מים, עם או בלי מעקה בטיחות.
2. מפרדה בין מסלולי התנועה, שרוחבה משתנה בהתאם לרוחב זכות הדרך, ובצדה מעקה לפי הצורך.
3. שוליים ברוחב כ-3 מ' לעצירה במצב חירום.

הרחוב העירוני כולל בדרך כלל את המרכיבים הבאים:

1. נתיב נסיעה שרוחבו מגיע ל-3.5 מ' ברחובות עורקיים, ועד 5 מ' לשני נתיבי נסיעה ברחובות מקומיים.
2. מפרדה ברוחב (2÷5) מ', המיועדת להפרדה בין נתיבי נסיעה, למניעת פניות פרסה, להקלה על הולכי רגל וכו'.
3. מדרכה ברוחב (2.5÷4) מ' המיועדת להולכי רגל.
4. נתיבי חניה עם רוחב משתנה של (2÷2.5) מ' עבור חניות לאורך הרחוב, ו-(4.25÷5) מ' לחניות בניצב לכביש.

## 2.2 מאפייני תנועת התחבורה

מאפייני התחבורה משמשים להערכה ולחיזוי של זרם התחבורה לקבלת החלטות על שיפורים במערכת הדרכים.

המאפיינים החשובים של זרם התחבורה מבחינת יצירת רעש סביבתי הם כדלקמן:

1. **נפח התנועה (Q)** - המספר הכללי של כלי רכב העובר בחתך של הדרך בפרק זמן מסוים, בדרך כלל שעה או יממה.

2. **מהירות התנועה (V)** - מהירות התנועה של כלי הרכב המהווה גורם עיקרי המשפיע על הרעש הנוצר מכבישים בין-עירוניים.

בהנדסת התעבורה מבחינים בכמה הגדרות של מהירויות תנועה:

**מהירות נסיעה ממוצעת (Average Travel Speed)** מחושבת עבור דרכים עירוניות על פי סך משך הזמן הכולל (תנועה + המתנה) של הרכב.

**מהירות נסיעה שוטפת (Average Running Speed)** מחושבת לפי משך התנועה של הרכב בלבד, ולכן מהירות מסוג זה מתארת את תנועת כלי הרכב בדרכים בין-עירוניות.

3. **צפיפות התחבורה (D)** - מספר כלי הרכב הנמצאים ברגע מסוים ביחידת דרך של 1 ק"מ.

יש להדגיש, שבעוד נפח התנועה הוא גודל נקודתי, הנקבע לפי חתך הדרך, הרי הצפיפות היא הגודל המרחבי הנקבע על ידי קטע הדרך.

את הקשר בין מאפייני התחבורה ניתן לבטא באמצעות הנוסחה:

$$Q = V * D$$

מנוסחה זו ניתן ללמוד שהגדלת צפיפות התנועה גורמת להקטנת מהירות הנסיעה של כלי הרכב.

4. **התפלגות התחבורה לפי סוגי כלי רכב** - מבחינה אקוסטית מאפיין זה חשוב מאוד, היות שהוא מדרג את התחבורה על פי כושר קרינת הרעש.

בהנדסת התחבורה משתמשים למטרות התכנון והחיזוי במושג "יחידות רכב משווה", כדלקמן:

$$Q_{(מ.ר.י)} = \sum_{i=1}^N Q_i N_i$$

כאשר:

$Q_i$  - נפח של כלי רכב מסוג "i"

$n_i$  - מקדם י.ר.מ. המוצג בטבלה 2.1

$i$  - מספר קבוצה של כלי רכב בחיזוי רעש תחבורה

$i=1$  - כלי רכב קלים: מכוניות, מוניות, טנדרים

$i=2$  - אוטובוסים

$i=3$  - משאיות עד 12 טונות

$i=4$  - משאיות מעל 12 טונות ואופנועים

## טבלה 2.1 – יחידות רכב מושווה בדרכים מהירות

טופוגרפיה		סוג		כלי רכב
הררי	גבעי	מישורי		
5	3	1.5		אוטובוס
8	4	1.7		משאיות

הצגת נפחי התחבורה בערכי י.ר.מ. מאפשרת תכנון אפקטיבי של דרכים, ולכן לעתים מידע זה הוא היחיד המסופק למתכנן האקוסטי.

ערכי (י.ר.מ.)  $Q$  מאפשרים לאקוסטיקאי לקבל מידע על נפחי תנועה ביחידות רכב, הנחוץ לחיזוי או לחישוב מפלסי הרעש רק על סמך משקלי הרכב וערכי התפלגות של סוגי הרכב השונים.

על המתכנן האקוסטי לקבל מידע זה בראש ובראשונה ממתכנן התחבורה.

קביעת התפלגות כלי רכב בנפחי תנועה מתאפשרת (בלית ברירה) בשתי דרכים נוספות:

1. ניתן להיעזר במידע של השנתון של הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה "ספירות תנועה בדרכים לא עירוניות".
2. ניתן לערוך מפקדי תנועה בקטעי הדרך הקיימים או דומים, על פי חלוקה של כלי הרכב לקבוצות הנדרשות לחיזוי אקוסטי.

את נפח כלי הרכב מקבוצה  $i$  ניתן לחשב לפי הנוסחה:

$$Q_j = \frac{Q_{(י.ר.מ.)}}{\sum_{i=1}^k p_i n_i} p_j$$

כאשר:

$Q$  (י.ר.מ.) - נפח התחבורה בערכי י.ר.מ.

$p_i$  - אחוז כלי הרכב מקבוצת "i" בנפח הכולל

$n_i$  - מקדם י.ר.מ. לקבוצה "i"

## 5. קיבולת דרכים, רמת שירות.

המטרה העיקרית בנייתוח הקיבולת מתבטאת בקביעת נפח התנועה המרבי. נפח התנועה המרבי בכביש תלוי בתנאי הדרך, בתנאי התחבורה ובתנאי הבקרה (תמרורים ורמזורים). רמת השירות היא מדד איכות זרימות התנועה המתחשב במהירות הנסיעה, במשך הנסיעה ובחופש התמרון.

נהוג להגדיר שש רמות שירות - ראה טבלה 2.2

### טבלה 2.2 – רמת שירות בקטעי דרך מהירה

מהירות נסיעה ממוצעת מינימלית, קמ"ש	נפח תנועה מרבי	צפיפות מרבית	רמת השירות
96.0	700	8	A
91.2	1,100	13	B
86.4	1,550	19	C
73.6	1,850	26	D
48.0	2,000	42	E
פחות מ-48	לא ידוע	92-מ	F

בתרשים מס' 2.3 מוצגות דרגות שונות של רמות השירות.

בדיקות תנועה של כלי רכב בכבישים בין-עירוניים הראו שמהירות הנסיעה של כלי רכב אינה משתנה בתחום רחב של נפחי תנועה, ולכן רמת השירות נקבעת בעיקר על ידי צפיפות התחבורה.

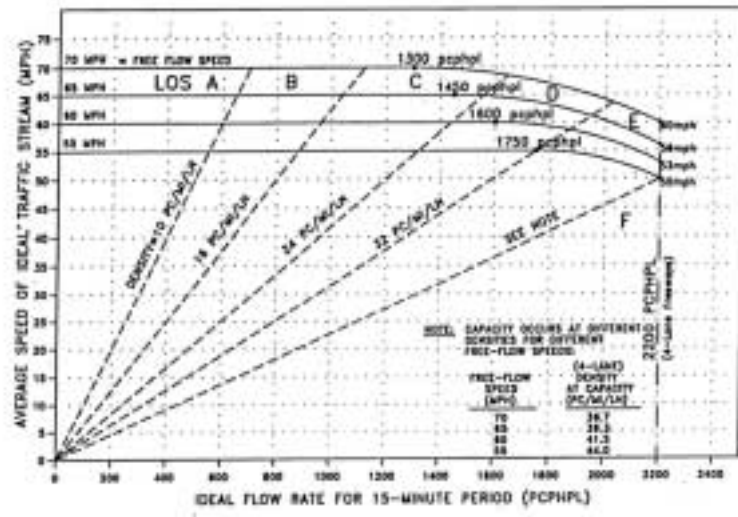
בתרשים מס' 2.4 מוצגות רמות השירות עבור כבישים בין-עירוניים דו-נתיביים ותלת-נתיביים בכל כיוון.

מתרשימים אלו ניתן ללמוד ששני המאפיינים - נפח התחבורה ומהירות תנועה, הקובעים את מפלסי רעש התחבורה, מגיעים לערכים מרביים ברמת שירות C, ולכן רמות הרעש המרביות מהכביש נגרמות גם הן ברמת שירות זו.

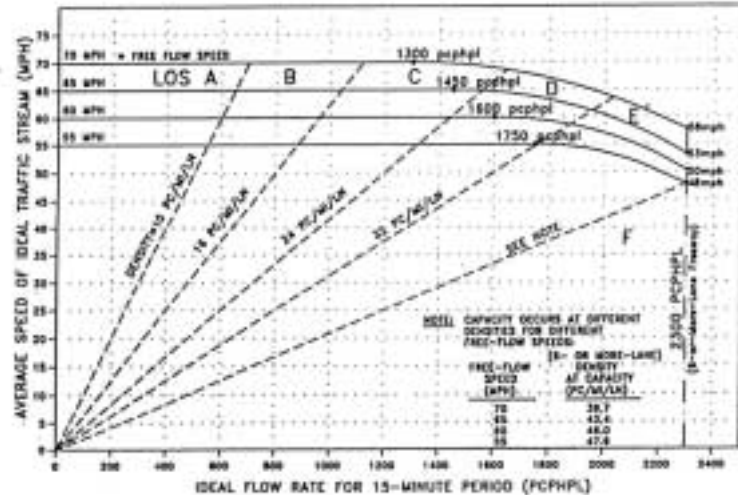
תרשים 2.3 – מצב תנועת אופייני בכל רמות השירות  
(*Highway Capacity Manual*)



תרשים 2.4 - רמות שירות עבור כבישים בין-עירוניים



(a)



(b)

Level of service criteria: (a) four-lane freeways, (b) six-or-more-lane freeways.

### 2.3 מודלים של זרימת תנועה

הקשר היסודי המאפיין את היקף התחבורה מתבטא באמצעות הנוסחה:

$$Q(V,D) = D * V(D)$$

תלות זו מאפיינת את התנועה בדרכים:

1. קיים מצב בדרך שבו נפח התחבורה מגיע לנפח המרבי, כאשר מהירות התנועה מגיעה לערכה האופטימלי במצב זה. כלומר, כלי רכב במספר מרבי עוברים באופן מתקבל על הדעת בקטע דרך.
2. כניסת כלי רכב נוספים גורמת להגדלת צפיפות התחבורה ולהקטנת מהירות התנועה. כאשר המהירות מגיעה לאפס, נוצר פקק תנועה, והצפיפות מגיעה לערכה המרבי:

$$D_{MAX} = \frac{1000}{l}$$

כאשר 1 - האורך הממוצע של כלי רכב

3. כאשר מספר כלי הרכב בכביש קטן, מתנהלת תנועה של כלי רכב בודדים במהירות הזרימה החופשית  $V_f$ .

#### 2.3.1 מודל ליניארי של חיזוי תחבורה

המודל הליניארי לחיזוי זרימת התחבורה מבוסס על הקשר הליניארי בין מהירות התנועה וצפיפותה (ראה תרשים 2.5 א):

$$V = V_f \left( 1 - \frac{D}{D_{max}} \right)$$

את נפח התחבורה ניתן לחשב על פי הנוסחה (ראה תרשים 2.5 ב):

$$Q = D * V$$

את צפיפות התחבורה ניתן לחשב לפי הנוסחה:

$$D = D_{max} \left( 1 - \frac{V}{V_f} \right)$$

המאפיינים האופטימליים במודל זה הם כדלקמן:

$$V_{opt} = \frac{V_f}{2}$$

1. מהירות אופטימלית -

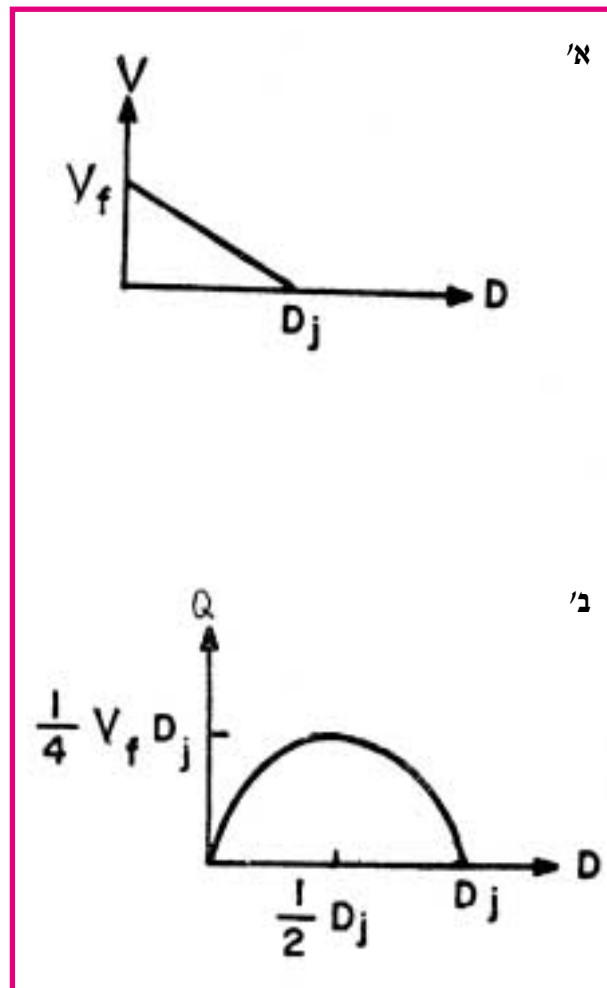
$$Q_{max} = \frac{V_f * D_{max}}{4}$$

2. נפח תנועה מרבי -

$$D_{opt} = \frac{Q_{max}}{2}$$

3. צפיפות אופטימלית -

תרשים 2.5 – התלות היסודית בין מאפייני זרם התנועה



### 2.3.2 מודל "מרחק התגובה"

המודל מניח שהרווח המיינימלי בין שני כלי רכב מאפשר לנהג לעצור את מכוניתו בעת ובעונה אחת עם הרכב שלפניו. במקרה זה המרחק בין המכוניות יהיה:

$$S = t * V + l$$

כאשר:

- t - משך העצירה, sec
- V - מהירות התנועה, m/sec
- l - האורך הממוצע של כלי הרכב, m

מאפייני זרם התחבורה במודל זה יחושבו לפי הנוסחה (ראה תרשים מס' 2.6):

1. מהירות התנועה -

$$V = \frac{1}{t} \left( \frac{1000}{1} - 1 \right)$$

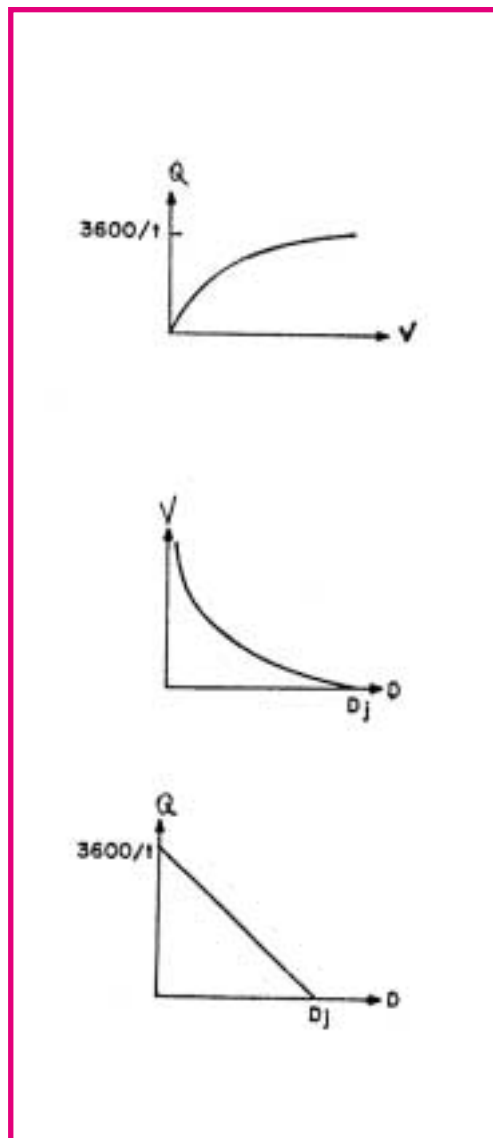
2. נפח התחבורה -

$$Q = \frac{3600 S}{t * V + 1}$$

3. צפיפות התחבורה -

$$D = \frac{1000}{t * V + 1}$$

תרשים 2.6 – התלות בין מאפייני זרם התחבורה במודל ליניארי



### 2.3.3 מודל "מרחק העצירה"

המודל מבוסס על ההנחה שהרווח המינימלי בין שני כלי רכב הוא זה המאפשר לנהג לעצור ללא התנגשות, אם הרכב שלפניו עוצר בפתאומיות.

במקרה זה מאפייני זרם התחבורה מחושבים לפי הנוסחאות (ראה תרשים מס' 2.7):

1. מהירות התנועה -

$$v = \frac{1}{2C} \left[ -t \pm \sqrt{t^2 - 4C \left( 1 - \frac{1000}{D} \right)} \right]$$

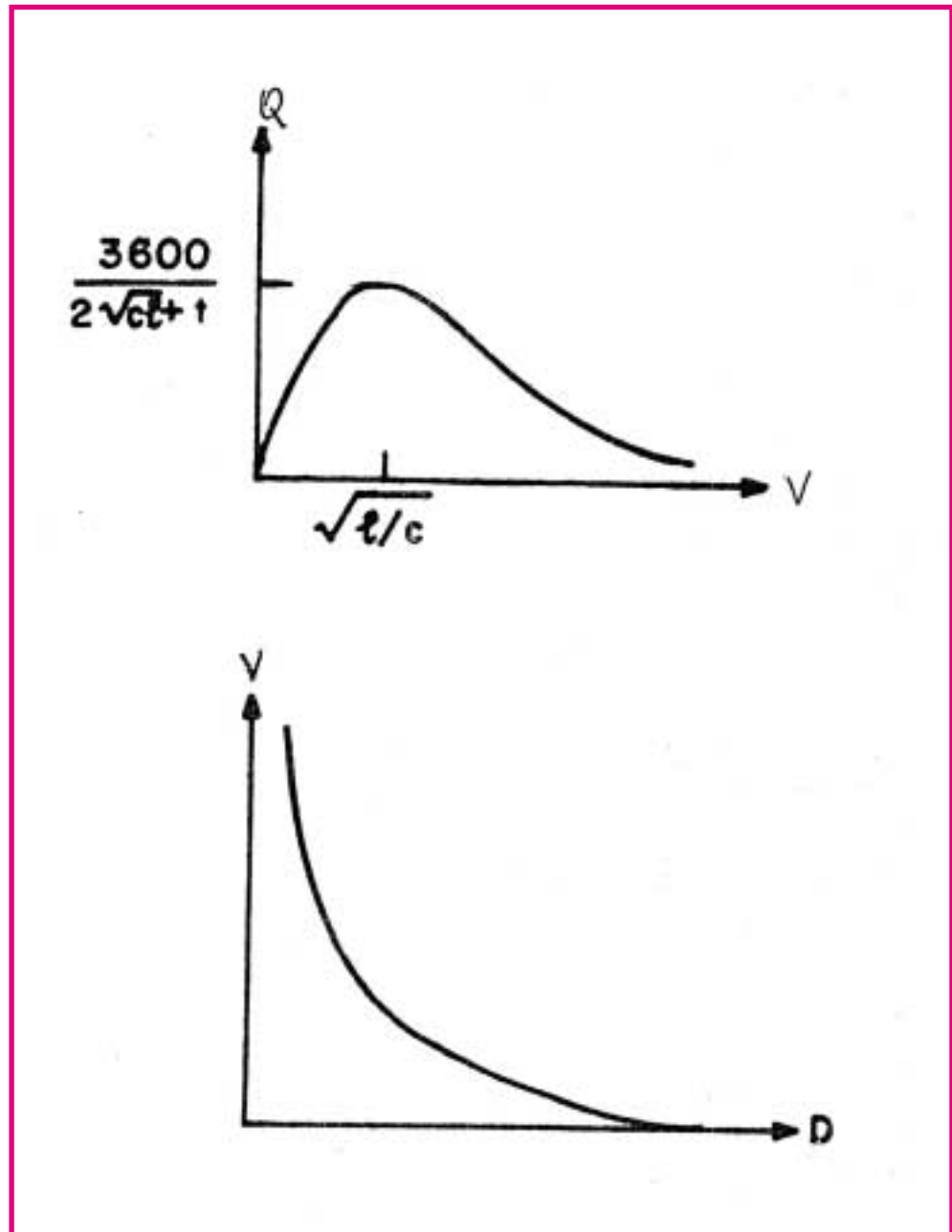
2. נפח התחבורה -

$$Q = \frac{3600 V}{CV^2 + TV + l}$$

3. צפיפות התחבורה -

$$D = \frac{1000}{CV^2 + tV + l}$$

תרשים 2.7 - התלות בין מאפייני זרם התחבורה במודל "מרחק העצירה"





# 3. מפלסים להערכת רעש מתחבורה

## 3.1 מפלסים סטטיסטיים להערכת רעש מתחבורה

מפלסי רעש תחבורה נקבעים על פי ניתוח סטטיסטי במהלך החשיפה לרעש זה. מפלסי רעש התחבורה מוגדרים כמפלסי רעש שסיכוייהם להיגרם עולים מעל ערך ההצטברות המסוים. כך לדוגמה, המפלס  $L_{90}$  הנו מפלס הרעש שסיכוי הופעתם של המפלסים העולים מעל מפלס זה הוא 90%.

מקובל להעריך את רעש התחבורה באמצעות המדדים הבאים:

1.  $L_{90}$  - מפלס רעש הרקע בסביבת עורקי תחבורה.
2.  $L_{50}$  - המפלס הממוצע של רעש התחבורה.
3.  $L_{10}$  - מפלס רעש התחבורה. ערך ההסתברות המצטברת הוא 10%.
4. מפלס הרעש שווה ערך,  $L_{eq}$ , מתאר את חשיפת האדם לרעשים בכלל ולרעש תחבורה בפרט.

## 3.2 מפלס הרעש שווה ערך, $L_{eq}$

המטרד הנגרם לאדם מושפע במידה שווה ממפלס הרעש וממשך החשיפה לרעש זה.

המפלס שווה הערך,  $L_{eq}$ , נבנה על בסיס חשיפת האדם לרעש, ולפי ההגדרה הנו מפלס של רעש דמיוני, קבוע בזמן, הגורם למטרד שחזקו זהה למטרד הנגרם על ידי הרעש המשתנה הנבדק.

המפלס  $L_{eq}$  מומלץ על ידי הוועדה הבין-לאומית לתקינה ISO R1996 להערכת השפעת רעשים סביבתיים, לרבות רעש תחבורה, על בני אדם.

את ערכי מפלס הרעש שווה הערך,  $L_{eq}$ , מחשבים לפי הנוסחה:

$$L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{L(t)}{10}} dt \right), dB(A)$$

כאשר:

$L(t)$  - הערך הרגעי של מפלס הרעש המשתנה בזמן

$T$  - משך השפעת הרעש

שיטת הקביעה של מפלס הרעש שווה הערך,  $Leq$ , מצביעה על שני גורמים עיקריים המשפיעים על ההרגשה הסובייקטיבית של בני אדם: מפלס הרעש המשתנה ומשך השפעתו.

הכפלת עצמת הרעש או משך ההשפעה גורמים לעליית המפלס  $Leq$  בשיעור של 3 dB. במילים אחרות, ערך  $Leq$  יישאר קבוע כאשר הכפלת עצמת הרעש תנוטרל על ידי הקטנת משך החשיפה פי שניים, ולהפך, אם מכפילים את משך החשיפה לרעש, יש להקטין את מפלסו בשיעור של 3 dB.

### 3.3 מפלס הרעש $L_{dn}$

קביעת מפלס הרעש  $L_{dn}$  מבוססת על מפלסי הרעש שווה הערך,  $Leq$ , הנקבעים לשעות היום והלילה, כאשר בשל הרגישות הגבוהה של האדם להשפעת רעשים בשעות הלילה (שעות המנוחה והשינה), מגדילים את המפלס  $Leq$  בשעות אלו בשיעור של 10 dB(A).

את המפלס  $L_{dn}$  ניתן לחשב לפי הנוסחה:

$$L_{dn} = 10 \lg \left[ \frac{16 * 10^{Leq_d/10} + 8 * 10^{(Leq_n+10)/10}}{24} \right] \text{ dB(A)}$$

במפלס  $L_{dn}$  משתמשים גם להערכת רעש המטוסים, כאשר הקשר בינו לבין ערכי תח"ר (NEF) הנו:

$$L_{dn} = NEF + 35, \text{ dB}$$

### 3.4 מפלס הרעש $L_{NP}$

קביעת מפלס  $L_{NP}$  (Noise Pollution Level) מבוססת על שני גדלים:  
 1. מפלס הרעש שווה הערך,  $Leq$  - המפלס המתאר את השפעת הרעש המשתנה בזמן על האדם.  
 2. השפעת שינויי המפלסים של הרעש המשתנה (אקלים אקוסטי).

ניתן לחשב את מפלס  $L_{NP}$  בעזרת הנוסחה:

$$L_{NP} = Leq + k\delta, \text{ dB(A)}$$

כאשר:

$Leq$  - מפלס הרעש שווה הערך

$k$  - מקדם קבוע -  $k = 2.56$

$\delta$  - סטיית התקן

בעזרת ניתוח סטטיסטי של רעשים עירוניים, לרבות רעש תחבורה, התקבלו כמה נוסחאות לחישוב מפלס זיהום הרעש  $L_{NP}$ :

$$L_{NP} = L_{eq} + (L_{10} - L_{90}), \text{dB(A)}$$

$$L_{NP} = L_{50} + (L_{10} - L_{90}) + \frac{(L_{10} - L_{90})^2}{60}, \text{dB(A)}$$



# 4. רעש מכלי רכב

תנועת הרכב גורמת להיווצרות רעשים עקב פעולת המנוע ומרכיביו, וגם עקב המגע בין הצמיגים לבין הכביש. במהלך מחקרים שונים נבדקה השפעת גורמים אלה, ונקבע שהמהירות הסיבובית של המנוע ומהירות התנועה של הרכב הן שני המאפיינים העיקריים המשפיעים על היווצרות רעשים מכלי הרכב.

## 4.1 השפעת המהירות הסיבובית של המנוע ברכב

עצמת הרעש הנוצרת על ידי מנוע הרכב תלויה בראש ובראשונה במהירות הסיבובית. נוסחאות להערכת עצמת רעש המנוע הן כדלקמן:

$$L = 30 \lg N + G_1, \text{ dB(A)} \quad \text{1. עבור מנוע דיזל -}$$

$$L = 50 \lg N + G_2, \text{ dB(A)} \quad \text{2. עבור מנוע בנזין -}$$

כאשר  $N$  - המהירות הסיבובית, 1/sec

$G_1, G_2$  - ערכים קבועים

שתי נוסחאות אלה מאפשרות הערכת רעש המנוע: הכפלת התדירות הסיבובית גורמת לעליית המפלס בשיעור של 9 dB(A) עבור מנוע דיזל ו-15 dB(A) עבור מנוע בנזין. מדוגמה זו ניתן ללמוד שבהספקים זהים מנוע בנזין רועש יותר ממנוע דיזל.

מפלסי הרעש הנוצרים ממנועי בנזין ודיזל כתלות במספר הסיבובים מוצגים בתרשים 4.1.

בתרשים 4.2 מוצג משקלם של רעשי המערכות השונות של הרכב.

מנוע כולל בין היתר שלוש מערכות רועשות: מערכת פליטת הגזים, מערכת יניקת האוויר והמאוורר. הרעש הנוצר על ידי מערכות אלה תלוי גם הוא בתדירות סיבובית והוא מוערך לפי הנוסחאות הבאות:

$$L = 45 \lg N + K_1, \text{ dB(A)} \quad \text{1. מערכת פליטת הגזים -}$$

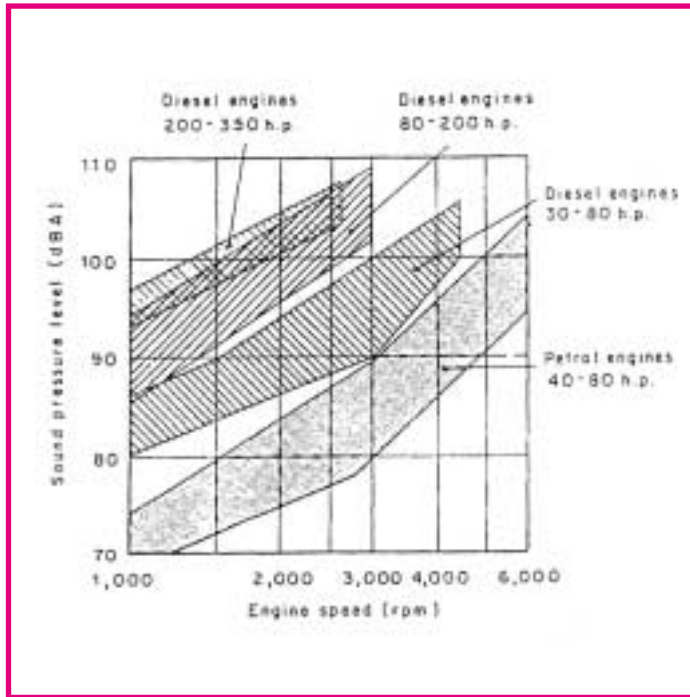
$$L = 45 \lg N + K_2, \text{ dB(A)} \quad \text{2. מערכת יניקת האוויר -}$$

$$L = 50 \lg N + K_3, \text{ dB(A)} \quad \text{3. מאוורר המנוע -}$$

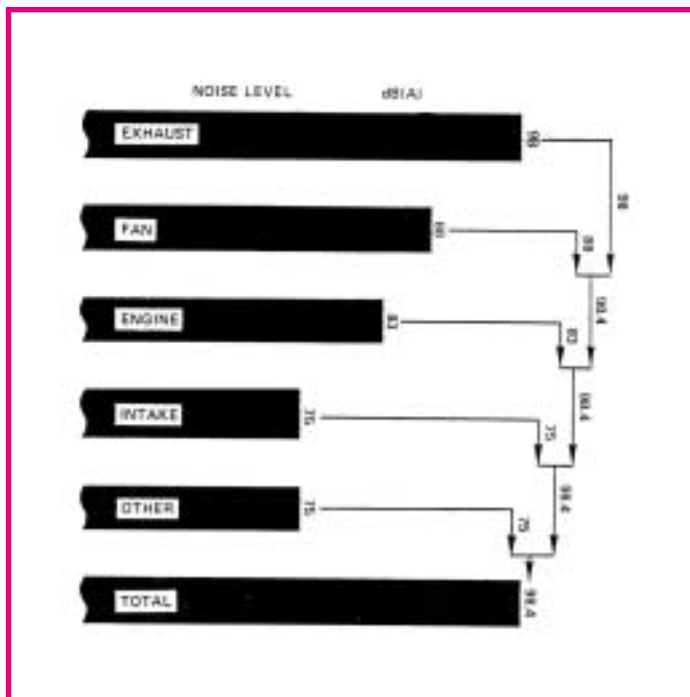
כאשר  $N$  - המהירות הסיבובית, 1/sec

$K_1, K_2, K_3$  - ערכים קבועים

תרשים 4.1 - רעש מנועי בנזין ודיזל כתלות במספר סיבובי המנוע



תרשים 4.2 - רעשי מערכות הרכב השונות



## 4.2 מהירות הנסיעה כגורם עיקרי לרעש מרכב נע

מהירות התנועה של כל כלי הרכב והמהירות הממוצעת של קבוצת כלי הרכב הן הגורם העיקרי המשפיע על היווצרות רעש התחבורה.

ההספקים האקוסטיים של כלי הרכב נקבעים בשיטה הסטטיסטית. את מפלס ההספק האקוסטי של כלי רכב ניתן להעריך באמצעות הנוסחה:

$$L_w = a + b \lg V$$

כאשר:

V - מהירות התנועה, קמ"ש

a, b - ערכים קבועים

1. עבור כלי רכב קלים, עד כ-4 טונות:

$$b=10 \quad a=80 \quad V \leq 40 \text{ kph}$$

$$b=30 \quad a=47 \quad V > 40 \text{ kph}$$

2. עבור כלי רכב כבדים:

$$b=0 \quad a=110 \quad V \leq 50 \text{ kph}$$

$$b=10 \quad a=93 \quad 50 \leq V \leq 70 \text{ kph}$$

$$b=29 \quad a=58 \quad V > 70 \text{ kph}$$

ההספקים האקוסטיים המאפיינים כלי רכב שונים מוצגים בטבלה 4.1

### טבלה 4.1 - הספקים אקוסטיים של כלי רכב

מפלס ההספק האקוסטי, dB	ההספק האקוסטי	תיאור כלי הרכב
105	0.03	כלי רכב קלים
115	0.3	משאיות

את מפלס הרעש מהכביש,  $L_{eq}$ , ניתן לחשב על סמך תנועת כלי רכב בודדים באמצעות הביטוי ללחץ אקוסטי הנוצר מכלי רכב נוסע בנקודת הבדיקה למשך החשיפה  $T=t_2-t_1$ :

$$p^2(t) = \frac{w\rho v}{2\pi r(t)}$$

כאשר:

w - ההספק האקוסטי של כלי הרכב

$\rho$  - צפיפות האוויר

v - מהירות התקדמות גלי הקול באוויר

$r(t)$  - המרחק מכלי הרכב לנקודת הבדיקה:

$$r^2(t) = d_A^2 + V^2 t^2$$

נוסחה זו ניתן לנצל לפיתוח נוסחה לחיזוי רעש תחבורה מעורק תחבורה שבו נעים כלי רכב מסוגים שונים. במקרה זה יש לקחת בחשבון את ההתפלגות הסטטיסטית של מפלסי הרעש הנוצרים ממקור מורכב כמו תנועת כלי הרכב. את מפלס  $L_{eq}$  במרחק  $d_A$  מהדרך, כאשר המהירות הממוצעת בדרך עולה על 60 קמ"ש, ניתן לחשב באמצעות הנוסחה:

$$L_{eq} = L_w - 10 \lg T - 10 \lg d_A \cdot V + 10 \lg \frac{Q}{A}, \text{dB(A)}$$

כאשר:

$L_w$  - ההספק האקוסטי של התחבורה

$T$  - משך החשיפה

$d_A$  - המרחק

$V$  - מהירות התנועה

$Q$  - "זווית הראייה" של הכביש מנקודת הבדיקה

בתרשים 4.3 מוצגת השפעת מהירויות הנסיעה של כלי רכב בסביבה עירונית ובין-עירונית על מפלסי הרעש הנוצרים, כתלות במצב תיבת ההילוכים.

במהירויות הנמוכות, עד 70 קמ"ש (הילוכים 1÷4), כאשר הרכב נוסע בדרכים עירוניות, המנוע מהווה מקור רעש עיקרי.

תלות מפלסי הרעש במהירות התנועה החופשית של כלי הרכב מוצגת בתרשים 4.4

בכבישים בין-עירוניים, במהירויות נסיעה העולות על 70 קמ"ש (הילוכים 4÷5), רעש הצמיגים הוא מקור הרעש עיקרי, כאשר הרעש האירודינמי והרעש ממערכת הפליטה מתווספים לרעש הכולל.

מפלסי הרעש הנוצרים על ידי צמיגים מסוגים שונים משתנים בתחום רחב מאוד של 20 dB ויותר, ולכן מעבר לצמיגים "שקטים" יותר עשוי להפחית את רעש התחבורה בשיעורים המשתווים לשיעורי הפחתת הרעש על ידי מתרסים אקוסטיים - ראה תרשים 4.5. לרוחב הצמיג השפעה גדולה על הרעשים הנוצרים והיא דומה לזו של מהירות התנועה. הגדלת המפלס ב- 9 dB(A) בהכפלת רוחבו [3].

$$L = 30 \lg V + 30 \lg B - 4, \text{dB(A)}$$

כאשר:

$V$  - מהירות התנועה של הרכב, m/sec

$B$  - רוחב הצמיג, מ'

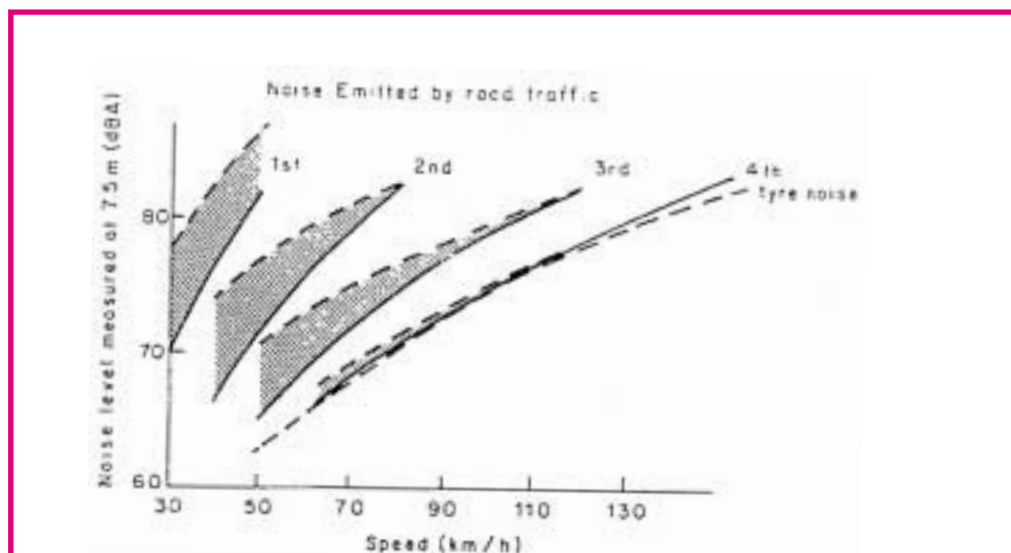
מצב הדרך ומבנה פני השטח משפיעים על טיב המגע בינם לבין הצמיג, ובדרך זו גם על הרעשים הנוצרים (תרשים 4.6).

כביש רטוב גורם להגברת מפלס הרעש במידה משמעותית, עד כדי 8 dB(A) - ראה טבלה 4.2.

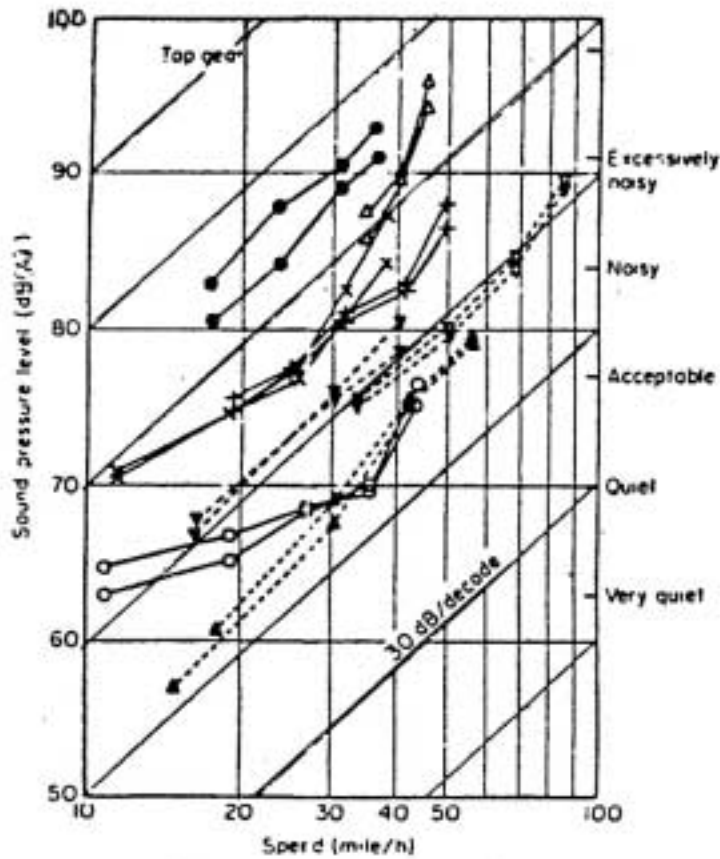
#### טבלה 4.2 - השפעה של הרטבת הכביש

מפלס הרעש, dB(A)	מצב פני הכביש
70	כביש יבש
75	כביש קצת רטוב
76	כביש רטוב
78	כביש רטוב מאוד

#### תרשים 4.3 - השפעת ההילוכים על מהירות התנועה ומפלס הרעש הנוצר

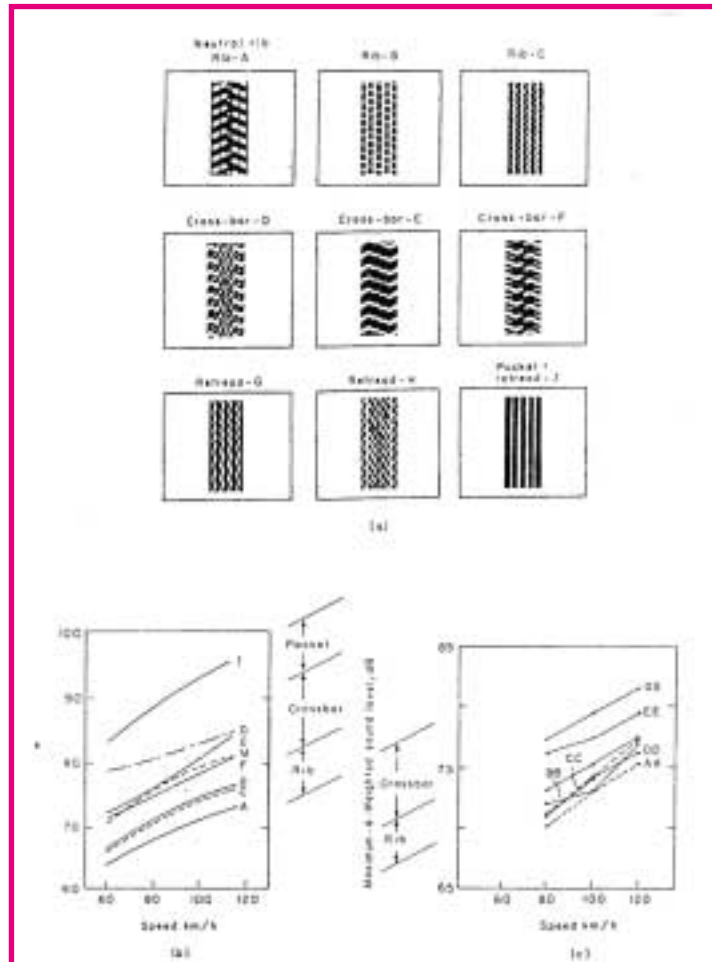


תרשים 4.4 - השפעת מהירות התנועה של כלי רכב



מנועי דיזל ●—● 12.5 ליטר; Δ—Δ 11.3 ליטר  
 X—X 5.2 ליטר; ○—○ 2.2 ליטר  
 מנוע בנזין ▼—▼ 4.9 ליטר; ▽—▽ 1.5 ליטר  
 ▲—▲ 1.1 ליטר.

### תרשים 4.5 - רעש מצמיגים



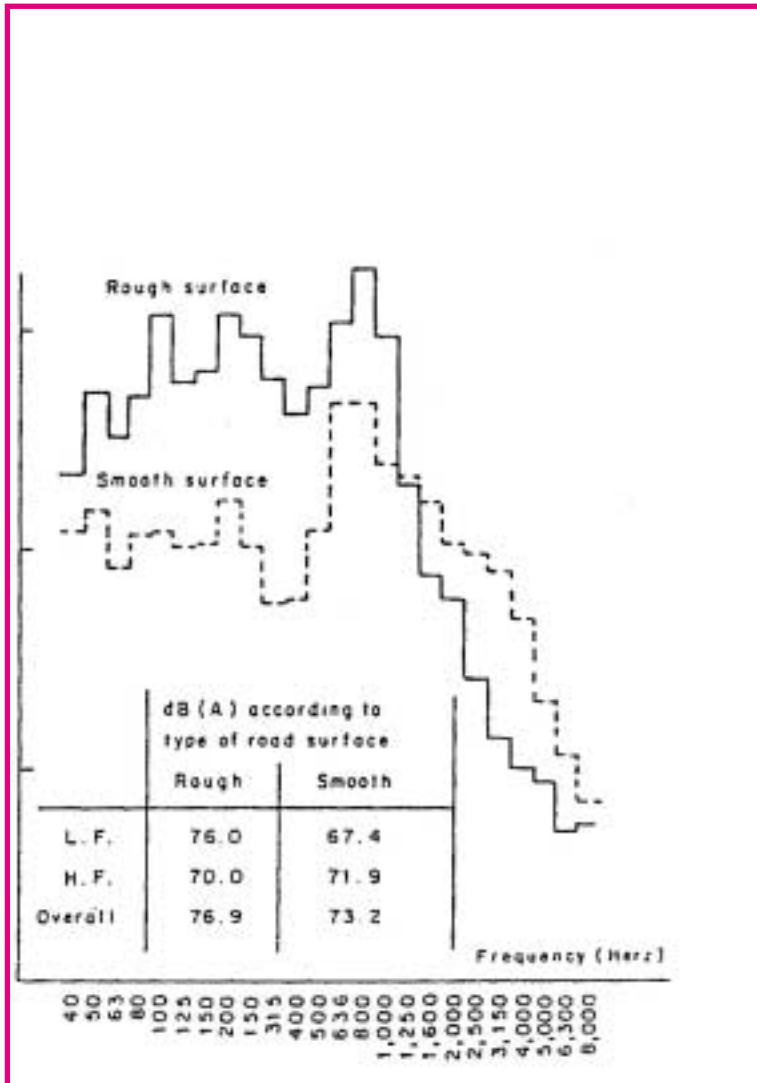
צורת פני השטח של הדרך משפיעה גם היא על הרעש הכולל הנוצר מרכב נע.

עדכון מפלסי הרעש לכבישים שונים [4] נרשמו בטבלה 4.3.

### טבלה 4.3 - השפעת חיפוי הדרך על היווצרות רעש מכלי רכב

תיקון, dB(A)	פירוט חיפוי דרך
-5	חיפוי חלק - אספלט עם שכבת איטום
0	אספלט או בטון עם חספוס בינוני, עם חללים קטנים מ-10 מ"מ.
+5	אספלט מחוספס עם חללים בגודל העולה על 10 מ"מ

תרשים 4.6 – השפעת פני הכביש



# 5. מאפייני רעש תחבורה

## בדרכים עירוניות

ברחובות העיר, שבהם המרחקים בין הצמתים קטנים יחסית, קיימת השפעה הדדית בין כלי הרכב. כך, תנועה של מספר קטן של כלי רכב עלולה להשפיע במידה רבה על התנועה כולה ולעתים לעוצרה קליל. יתר על כן, ככל שגדלה צפיפות התחבורה, גדלה והולכת ההשפעה ההדדית בין כלי הרכב, ולבסוף, כאשר צפיפות התחבורה מגיעה לשיא (רכב צמוד לרכב), מהירות התנועה מתקרבת לאפס והתנועה נעצרת. תמונה זו ניתן לראות מדי פעם ליד הרמזורים או ברחובות עירוניים קצרים. תנועה זו מוגדרת כתנועת "עצור וסע" (Interrupted flow).

בדרכים עירוניות מהירות התנועה אינן עולות מעל (70÷80) קמ"ש, ולכן מנוע הרכב הוא מקור הרעש העיקרי. למעשה, מהירות התנועה אינה משפיעה כלל על תהליך היווצרות הרעש [5, 6].

התפשטות רעש התחבורה בעיר מושפעת מגורמים רבים: צורת הרחוב, רוחבו, המרחק בין רמזורים וכו'. ריבוי הגורמים המשפיעים על רעש התחבורה העירונית קובע גם את הדרך הסטטיסטית להערכתו ולחיזויו.

התפלגות מפלסי רעש התחבורה העירונית קרובה להתפלגות גאוס, והיא המאפשרת קביעת מקדמים בנוסחאות לחיזוי רעש תחבורה עירונית.

נוסחת הרגרסיה הסטטיסטית, המתארת רעש התחבורה העירונית, היא:

$$Leq = a_1 \lg Q + a_2 \lg P + a_3 \lg d_A + a_4 \lg G + a_5$$

כאשר:

Q - נפח התחבורה, כלייר לשעה

P - אחוז כלי רכב כבדים, אוטובוסים ומשאיות למיניהן

$d_A$  - המרחק מהכביש, מ'

G - שיפוע

$a_1$  - מקדמי הרגרסיה המתקבלים במהלך הניתוח הסטטיסטי של רעש התחבורה

על פי סקר רעש תחבורה ב- 55 אזורים בלונדון [ 6 ] התקבלה נוסחה לקביעת מפלס  $L_{10}$ :

$$L_{10} = 49 + 11.5 \lg Q + 0.14P - 11.5 d_A, \text{ dB (A)}$$

נוסחאות להערכת רעש תחבורה עירונית נקבעו במהלך מחקר בעיר סידני, אוסטרליה [7]:

$$L_{10} = 10.7 \lg Q + 0.3P - 18.5 d_A + 56, \text{ dB (A)}$$

$$Leq = 10.2 \lg Q + 0.3P - 19.3 d_A + 55.6, \text{ dB (A)}$$

Gilbert [5] ערך מדידות מפלסי רעש ב-134 אזורים מגורים עם כבישים בעלי שיפוע. באמצעות ניתוח סטטיסטי בעזרת שיטת מינימום סכום הרבועים, התקבלה נוסחה לחיזוי מפלס  $L_{10}$ :

$$L_{10} = 10.52 \lg Q (1 + 0.04p) - 5.74 \lg (d_A + 0.5y) + 2.38 \lg G + 48.5, \text{ dB(A)}$$

כאשר:

G - שיפוע הכביש

y - רוחב הכביש

ניסיון להתחשב במהירות התנועה הביא לפיתוח נוסחה, המאפשרת חישוב ערך של המפלס  $L_{10}$  במרחק של 10 מ' מהכביש:

$$L_{10} = 10 \lg Q + 33 \lg \left( V + 30 + \frac{500}{V} \right) + 10 \lg \left( 1 + \frac{5P}{V} \right) - 27.6, \text{ dB(A)}$$

כאשר V - מהירות התנועה הממוצעת

על סמך סקר רעש תחבורה שנערך בשלוש הערים הגדולות בישראל - תל אביב, ירושלים וחיפה, פותחו נוסחאות להערכת מפלסי רעש תחבורה [8]:

$$L_{10} = 11.5 \lg Q + 0.13P - 13.8 \lg d_A + 55.1, \text{ dB (A)}$$

$$Leq = 12.4 \lg Q + 0.14P - 17.4 \lg d_A + 53.3, \text{ dB(A)}$$

על סמך נוסחאות הרגרסיה הניל פותחו נומוגרמות להערכת רעש התחבורה בישראל - ראה תרשים 5.1.

השפעת נפח התחבורה על הרעשים הנוצרים ברחובות בישראל מוצגת בתרשים מס' 5.2.

מחקר מקיף על רעש התחבורה [9] הראה שבתוך העיר מפלס רעש התחבורה עולה במידה ניכרת, כאשר היקף התחבורה עולה עד 1,000 כ"ש. הגדלת Q מעל לערך הניל לא גורמת לעליית מפלס הרעש הנוצר, ראה תרשים 5.2.

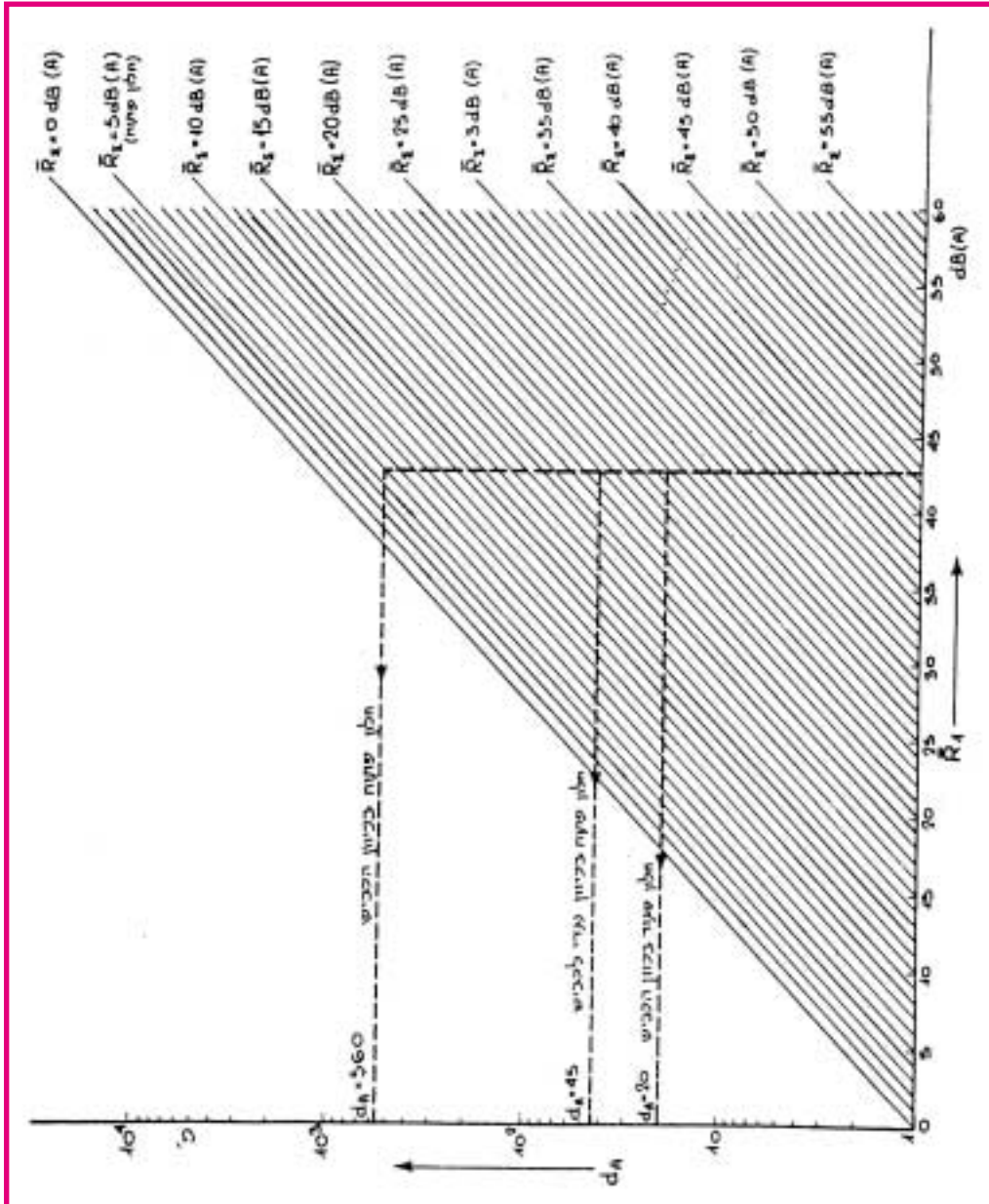
מאפייני הרחוב, המשפיעים על רעש התחבורה הנוצר בתוך הבתים, הם כדלקמן:

1. רוחב הרחוב
2. גובה הבניינים
3. הצורה הארכיטקטונית החיצונית של הבניינים
4. תכונות אקוסטיות של המעטפת החיצונית

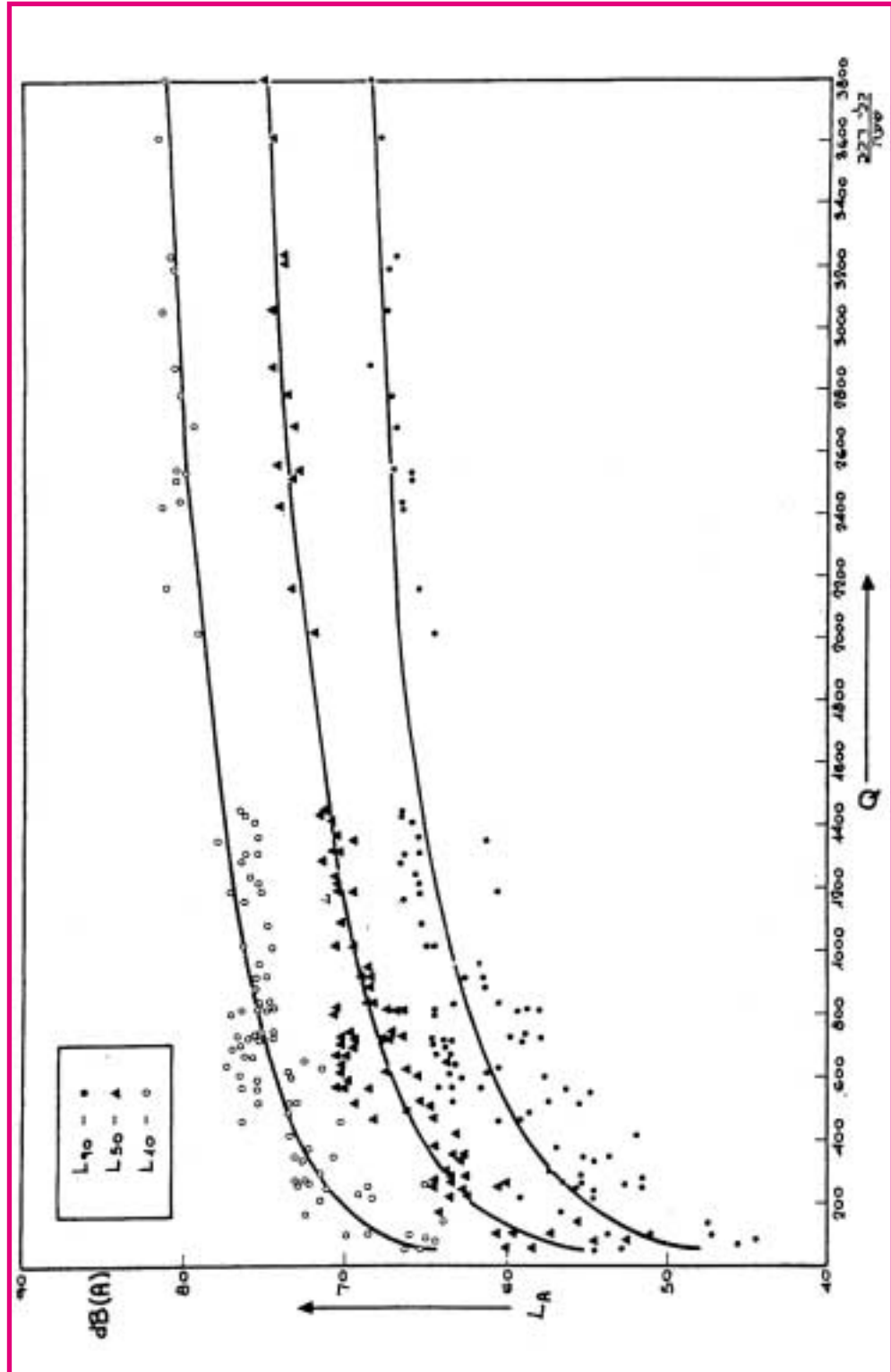
ככל שהרחוב העירוני צר והבניינים בו גבוהים, גדל מספר ההחזרות של גלי רעש התחבורה, הגורמות להגעת רעשים חזקים גם לקומות העליונות [10]. מפלס הרעש הנמדד ברחוב כזה גבוה בשיעור של כ-6 dB(A) ממפלס הרעש הנוצר ברחוב דומה אולם חופשי מבניינים בצדדיו.

שיעור הגדלה זו תלוי במרחק בין המבנים, במקדם ההחזרה, בצורתו הארכיטקטונית של הבניין ובספקטרום הרעש.

תרשים 5.1 - נומוגרמות לתכנון אקוסטי של בתי מגורים



תרשים 5.2 - השפעת נפח התחבורה העירונית על מפלסי רעש התחבורה





# 6. מאפייני רעש תחבורה

## בדרכים בין-עירוניות

בדרכים בין-עירוניות מתנהלת בדרך כלל תנועה חופשית של כלי רכב, ללא הפרעה הדדית ביניהם. תחום השתנות המהירויות הוא רחב יחסית, אולם למרות זאת, ניתן לקבוע את ערך המהירות הממוצע, המאפיין את תנועת התחבורה בכללותה (free flow).

נפח התחבורה ומהירותה הם שני המאפיינים המשפיעים ביותר על הרעש מדרכים בין-עירוניות. מפלסי הרעש כתלות בנפח התחבורה הבין-עירונית מוצגים בתרשים 6.1. השפעת המהירות על הרעש הנוצר מדרך בין-עירונית מוצגת בתרשים 6.2. שיטת החישוב של מפלסי הרעש מדרכים בין-עירוניות מבוססת על ההנחה שהרעש נגרם על ידי כלי רכב בלבד:

$$Leq = 10 \lg Q + 20 \lg V - 10 \lg d_A + 10 \lg \frac{\theta}{\pi} + 14, \text{ dB (A)}$$

כאשר:

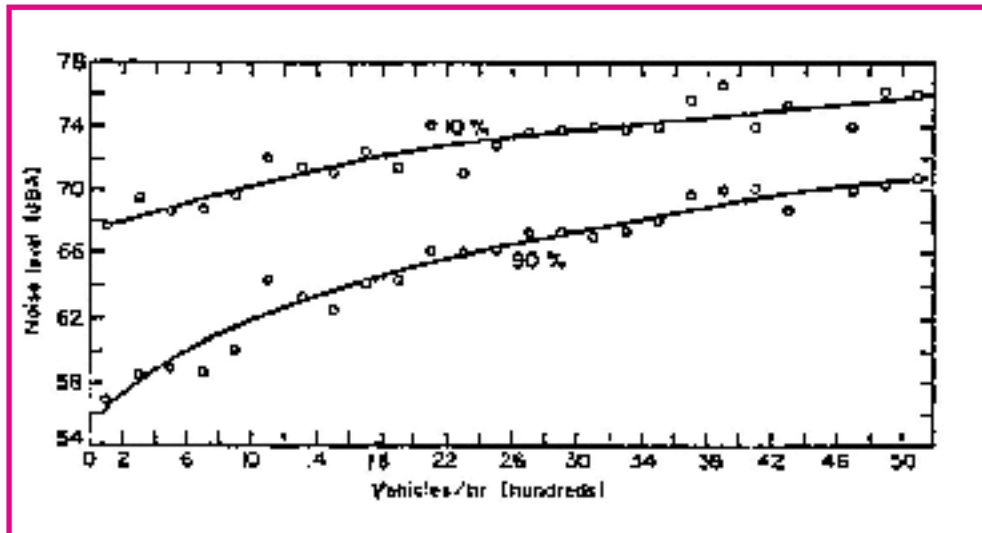
Q - נפח התחבורה

V - מהירות התנועה, מ' לשנייה

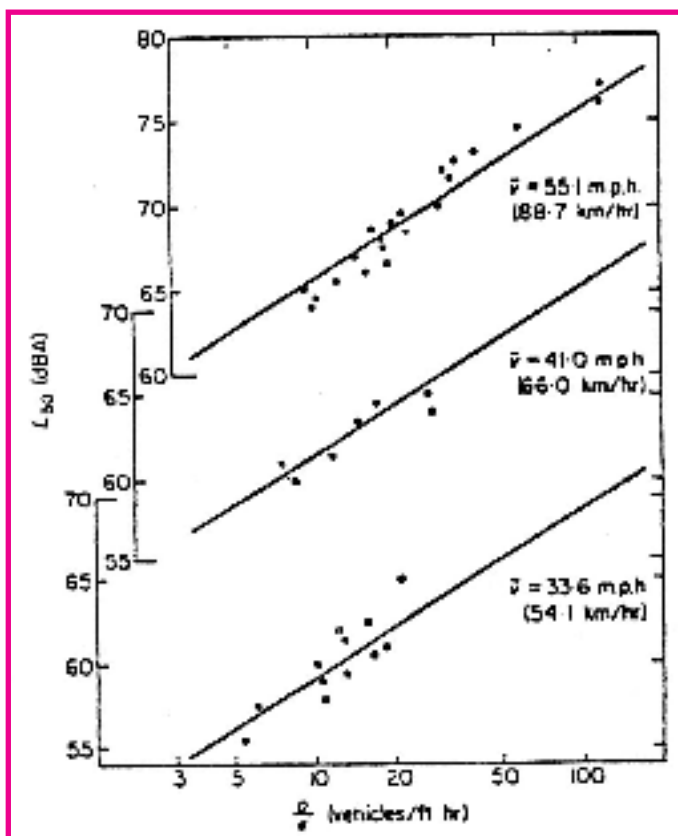
$d_A$  - המרחק לנקודת המדידה, מ'

$\theta$  - "זווית הראייה" של הכביש מנקודת המדידה

תרשים 6.1 - מפלס הרעש כתלות בצפיפות התחבורה בדרך בין-עירונית



תרשים 6.2 - השפעת מהירות התנועה הממוצעת של תנועה חופשית



# 7. השפעות סביבתיות על התפשטות רעש התחבורה

## 7.1 השפעת שיפוע הדרך

תנועת כלי רכב בדרכים בעלות שיפוע גורמת להיווצרות כוחות הפועלים בכיוון התנועה (ירידה בכביש) ובכיוון הנגדי (עלייה בכביש). מקדם שיפוע הדרך  $G$  מוגדר באמצעות הנוסחה:

$$G = \frac{h}{1} \times 100\%$$

כאשר:

$h$  - שינוי הגובה בקטע כביש באורך  $l$

השפעת שיפוע הדרך על היווצרות הרעשים תלויה בגורמים רבים שמקורם ברכב עצמו ובתחבורה בכלל. לכן גישה מופשטת לתיאור השפעת השיפוע עלולה להביא לשגיאות משמעותיות מאוד, כיוון ששיפוע הכביש משפיע גם על מאפייני רעש תחבורה אחרים, כגון מהירות התנועה וצפיפות התחבורה.

שינוי מפלס הרעש בהתאם לשיפוע הדרך הבין-עירונית מוצג בטבלה 7.1.

### טבלה 7.1 - השפעת שיפוע הדרך על רעש מדרכים

הגדלת מפלס רעש התחבורה, dB(A)	ערך השיפוע, %
0	2
2	3 ÷ 4
3	5 ÷ 6
5	7

## 7.2 השפעת חיפוי הקרקע

השפעת הקרקע על הפחתת מפלסי רעש תחבורה מורכבת מכמה גורמים כגון: אופי הקרקע וצורתה, המרחק בין עורק תחבורה לבין נקודת המדידה ו"זווית הראייה". הפחתת מפלס הרעש, המתפשט על פני קרקע קשיחה, קטנה יחסית, ובמרחקים קטנים מ-100 מ' ניתן לא להתחשב בה כלל.

הקטנת מפלס הרעש על ידי חיפוי קרקע תלויה גם בהרכבו הספקטרולי של הרעש, כאשר היא גדלה עם הגדלת התדירות ומגיעה לשיאה סביב התדירות על 600 Hz - ראה תרשים 7.1.

ניתן לחשב את השתנות הרעש עקב התפשטותו מעל הקרקע המכוסה בדשא או בשיחים נמוכים, באמצעות הנוסחה:

$$\delta L = 6 \lg \left( \frac{s^2}{1+0.01 s^2} \right)$$

$$s = (0.14 r 10^{-0.3 h_m}) / h_k > 1$$

$$s \leq 1 \quad \delta L = 0$$

כאשר:

r - המרחק בין הכביש לבין קולט הרעש

$h_m$  - גובה מקור הרעש

$h_k$  - גובה קולט הרעש

מקובל להתחשב בבליעת הקרקע המכוסה בצמחייה נמוכה, כאשר "זווית הראייה" של קולט הרעש מהמקור אינה עולה על:

$$\theta = 10^0$$

יש להדגיש שנושא בליעת הקרקע מקבל חשיבות גדולה במודלים שונים לחיזוי רעש תחבורה. התחשבות בבליעת הקרקע גורמת לשינוי המפלס בשיעור של 4.5 dB(A) על כל הכפלת המרחק, לעומת 3 dB(A) ללא התחשבות בגורם זה.

יש להשתמש בזהירות רבה במקדמי בליעת הקרקע בחיזוי רעשי תחבורה, כיוון שעל ידי מניפולציה במקדם זה ניתן בקלות לשנות מקצה לקצה את תוצאות החיזוי. לפיכך, יש לנמק את הסיבות בצירוף חישובים.

רצוי לקבוע את ההשפעה של חיפוי הקרקע על התקדמות גלי רעש מהכביש בשני אופניים:

1. במקרה של הרחבת כביש קיים מומלץ לערוך כיוול תכנת המחשב על פי תוצאות המדידות של מפלסי הרעש בבתי המגורים האופייניים מחד, ולערוך מפקד תחבורה מאידך.

2. כאשר מתכננים כביש חדש, ניתן לערוך בדיקות התקדמות גלי רעש על ידי השמעת רעש תחבורה באמצעות רמקול ומדידת המפלסים במרחקים השונים מהכביש.

תרשים 7.1 – השפעת בליעת הקרקע על התפשטות גלי רעש תחבורה

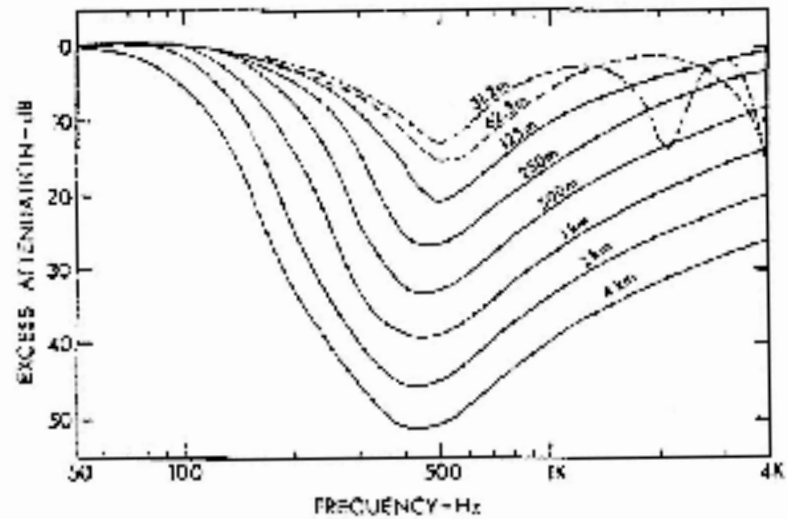


Figure 2.10 Excess attenuation calculated for propagation from a point source over mown grass for  $h_s = 1.8$  m,  $h_r = 1.5$  m, and the distances of propagation  $d$  indicated.

### 7.3 השפעת תנאים אקלימיים על התפשטות רעש התחבורה

התנאים האקלימיים, כגון ההפחתה המולקולרית באוויר, רוח וטמפרטורה, משפיעים בדרך כלל על התקדמות הרעש למרחקים גדולים, מעל 300 מ'.

במרחקים אלו רמות רעש התחבורה נמוכות יחסית, ולכן גם השפעת המאפיינים האקלימיים איננה קריטית.

רוח גורמת להפחתת מפלס הרעש, כאשר היא מתקדמת לכיוון מקור הרעש, ולהפך, היא מביאה לעליית המפלס, כאשר התקדמותה בכיוון הנגדי.

בדיקות השפעת הרוח שנערכו באנגליה [12] הראו שרוח במהירות 16 קמ"ש גורמת לשינוי מפלס רעש התחבורה בשיעור של 0.3 dB(A), בהתקדמותה מ-50 מ' ועד 200 מ'.

בטבלה 7.2 מוצגת השפעת מהירות הרוח על רעש התחבורה.

### טבלה 7.2 – שינוי מפלסי רעש התחבורה עקב השפעת הרוח

מהירות הרוח, קמ"ש	תיקון המפלס, dB(A)
6.60 ÷ 0	ללא שינוי
21.9 ÷ 6.60	± 0.1 (*)
35.1 ÷ 21.9	± 0.2
43.9 ÷ 35.1	± 0.3

(\*) סימן "+" - כאשר רוח מתקדמת לכיוון הקולט  
סימן "-" - כאשר רוח מתקדמת לכיוון מקור הרעש

# 8 - תקינה אקוסטית לרעש

## תחבורה

רעשים מדרכים גורמים למטרדים והפרעות בשעות היום, ולהפרעות שינה בשעות הלילה, העלולות לגרום לנזקים בריאותיים.

התקינה האקוסטית הבין-לאומית קובעת ברוב המקרים רמות רעש מרביות הן לשעות היום והן לשעות הלילה.

הדרישות נקבעות בדרך כלל לנקודת מדידה מחוץ למבנה, וזאת בשני מצבים:

1. במרחק של 1 מ' מחזית המבנה – כולל החזרות גלי הרעש ממעטפת המבנה.
2. בשדה פתוח, ללא השפעת החזרות גלי רעש ממעטפת המבנה.

התקינה האקוסטית העכשווית מבוססת היום על מפלס רעש שווה ערך,  $Leq$ .

בטבלה 8.1 מוצגות דרישות לרעש תחבורה הנהוגות במדינות השונות.

בישראל מופעלות התקנות למניעת מפגעים (רעש בלתי סביר), תש"ן, 1990, המגדירות את רמות הרעש המרביות בתוך חדרי מגורים ובמבנים רגישים לרעש, כגון בתי חולים, בתי החלמה ובתי ספר, כאשר חלונותיהם פתוחים.

תקנות אלו אינן כוללות דרישות לרעש מכבישים, אולם הן משמשות בסיס להכנת ההמלצות לתקנות רעש התחבורה.

בשנים 1998-1999 הכינה הוועדה הבין-משרדית לקביעת תקני רעש מכבישים קריטריונים לרעש מדרכים [14].

הוועדה הגדירה שני סוגי דרכים:

1. "דרך חדשה" - דרך שאיננה קיימת ואיננה מאושרת סטטוטורית.
2. "דרך קיימת" - דרך הכלולה בתכנית הכוללת הוראות ברמה של תכנית מפורטת או בהתאם להוראות סעיף 277 ז' לחוק התכנון והבנייה.

הוועדה הגדירה גם את המושג "שינוי מהותי בדרך קיימת" - שינוי פיזי בחתך הרוחב או בחתך האורך של הדרך, או כל שינוי פיזי אחר בדרך, הגורם לעליית מפלס הרעש מהדרך ביותר מ-3 dB(A), בהשוואה למפלס הקיים לפני השינוי.

קולטי רעש יוגדרו לפי שתי קבוצות, בדומה לחלוקה לפי התקנות למניעת מפגעים (רעש בלתי סביר), תש"ן, 1990:

1. "מבנה א" - בניין המשמש כבית חולים, בית הבראה, בית אבות עם מחלקה סיעודית ומוסדות חינוך".
2. "מבנה ב" - בניין באזור מגורים בהתאם לתכנית על פי חוק התכנון והבנייה".

רעש התחבורה תואר באמצעות מפלסי רעש שווה ערך,  $Leq$ .

## טבלה 8.1 – קביעת קריטריונים לרעש מדרכים בהתאם לרעש סביבתי קיים

הערות	מפלס הרעש Leq			מפלס הרעש	המדינה
	מקום מדידה	שעות הלילה	שעות היום		
	--	--	67	Leq שעת שיא	ארה"ב
דרכים קיימות בנייה חדשה	FF* FF	49 45-40	59 55-50	Leq ליום ולילה Leq	גרמניה
דרכים קיימות בנייה חדשה	FF FF	57 42	63 55	Leq ליום ולילה	אנגליה
דרכים חדשות	F**	57-55	65-60	Leq ליום ולילה	צרפת
	--	--	65	Leq	איטליה
דרכים קיימות בנייה חדשה	F F	55 50	65 60	Leq ליום ולילה	ספרד
דרכים חדשות	FF	50	60	Leq	אוסטריה
דרכים חדשות	FF	55	55	Leq 24 שעות	דנמרק
דרכים חדשות	FF	55	55	Leq 24 שעות	שבדיה
דרכים קיימות בנייה חדשה	F F	-- 55	68 60	L <sub>10</sub> 18 שעות	אוסטרליה

\* מדידה מחזית הבניין בשדה פתוח, ללא החזרות.

\*\* מדידה במרחק של 1 מ' מהחזית.

הקריטריונים - מפלסי רעש Leq, המרביים המותרים, שיחולו על דרכים הכלולות בתמ"א 3, למעט דרכים שיש בהן נגישות ישירה לשימושי קרקע, על דרכים חדשות ועל שינויים מהותיים בדרכים קיימות.

עד לתאריך 1/1/2003 ייקבע בנפרד מפלס רעש שווה ערך, Leq, לשעות שיא רעש ביום (6:00-22:00).

לאחר 1/1/2003 יוגדרו מפלסי רעש Leq, לשעות שיא רעש ביום (6:00-22:00) ולשעות שיא רעש בלילה (6:00-22:00).

ערכים אלו ייקבעו במשותף על ידי המשרד לאיכות הסביבה, משרד הפנים וחברת מע"ץ עד לינואר 2003.

הקריטריונים הבסיסיים לשעות שיאי רעש יום הם כדלקמן:

$$1. \text{ "מבנה א" - } Leq = 59 \text{ dB(A)}$$

$$2. \text{ "מבנה ב" - } Leq = 64 \text{ dB(A)}$$

קריטריונים אלו יותאמו בהתאם לרמות רעש תחבורה קיים, בעת עריכת בדיקה אקוסטית של הדרך - ראה טבלה 8.2.

## טבלה 8.2 – קביעת קריטריונים לרעש מדרכים בהתאם לרעש תחבורה קיים

רמת הרעש לפני סלילת הדרך החדשה או לפני השינוי הייתה מעל הקריטריון הבסיסי $Leq > 67dB (A)$		רמת הרעש לפני סלילת הדרך החדשה או לפני השינוי הייתה בתחום הקריטריון הבסיסי $64 < Leq \leq 67dB (A)$		רמת הרעש לפני סלילת הדרך החדשה או לפני השינוי בדרך הייתה נמוכה מהקריטריון הבסיסי $Leq \leq 64dB (A)$		
מבנה ב'	מבנה א'	מבנה ב'	מבנה א'	מבנה ב'	מבנה א'	
67	62	מפלס הרעש הקיים לפני השינוי המהותי	מפלס הרעש הקיים לפני השינוי המהותי	64*	59*	דרך חדשה
67 (70**)	62 (65**)	מפלס הרעש הקיים לפני השינוי המהותי	מפלס הרעש הקיים לפני השינוי המהותי	64	59	שינוי מהותי בדרך קיימת
67	---	מפלס הרעש הקיים לפני השינוי המהותי	---	64*	---	במרחק 100 מ' משמורות טבע ואתרים לאומיים ומאתרי הנצחה, (התכנית הופקדה) שבהם שוהה קהל

\* כאשר השגת הקריטריון הבסיסי מחייבת קירוי חלקי או מלא - יבוצע פתרון משולב של מיגון אקוסטי עם מיגון דירת.

\*\* אם תימצא עלייה במדרגת העלויות.

ואלה אמות המידה לקביעת "עלייה במדרגת עלויות":

1. כאשר נדרש מעבר ממותרס רעש רגיל לקירוי, חצי קירוי, לצורך עמידה ברמת הקריטריון המחמיר יותר.
2. כאשר נדרש שינוי ממערך מתרסי הרעש לאורך השוליים החיצוניים של הדרך למערך "מפוצל" המחייב הקמת מתרסים בתוך הדרך (בין שני המסלולים, לאורך הגשרים), לשם עמידה ברמת הקריטריון המחמיר יותר.
3. כאשר נדרשת העתקת תשתיות מהותיות לצורך שיקוע הדרך, לשם עמידה ברמת הקריטריון המחמיר יותר.
4. העתקת תשתיות מהותיות היא:
  - הפיכת קווים גרוויטציוניים לקווי סליקה.
  - שיקוע קווי חשמל ממתחים של 3 קילוואט ומעלה.
  - העתקת תשתיות כבדות של בזק ובמיוחד סיבים אופטיים.
  - מובילי מים גדולים (מ"מ 20 ומעלה).
5. כל אחת מסוגיות אלו תגרום לעלייה משמעותית בעלויות, ולכן לחוסר כדאיות בקביעת הקריטריון המחמיר.

על פי המפרט הבין-משרדי יוגדרו הגבהים המרביים של מתרסי רעש:

1. הגובה המרבי למתסר רעש המתוכנן כקיר שאינו נתמך (Free standing wall) יהיה 6 מ' מעל מפלס הקרקע שעליה הוא ניצב (לא כולל קיר תמך), אך הוא לא יעלה על 2/3 מהמרחק בין המתסר לקו המבנה.
2. הגובה המרבי של סוללת עפר יהיה 8 מ'.
3. הגובה המרבי של שילוב סוללה וקיר יהיה 10 מ'.
4. בהסכמת המשרד לאיכות הסביבה, ניתן לסטות מכללים אלה מבלי לגרוע מהאמור לעיל. מתסר הרעש יתוכנן להפחתת רעש למינימום של 5 dB(A).

השימוש ב"אספלט שקט" (אספלט נקבובי בעל תכונות בליעת אנרגיה אקוסטית) ייעשה רק כאשר צפויה חריגה של 2 dB(A) בלבד מהקריטריון האקוסטי.

ניתן לשלב את "האספלט השקט" במתסר רעש רק כאשר יעילותו של המתסר קטנה מ-7 dB(A).

בכל מקרה, השימוש ב"אספלט שקט" מותנה בקיום תכנית תחזוקה שתבטיח שמירת יעילותו האקוסטית.

המיגון הדירתי יתבצע כאשר, על פי החישובים, מפלס הרעש החזוי יחרוג מהקריטריון לאחר התכנון המפורט של המיגונים האקוסטיים, כגון מתרסי רעש או סוללות עפר.

מיגון חזיתות מבנים זכאים יבוצע על פי העקרונות הבאים:

1. אם מפלס הרעש החזוי מחוץ למבנה קולט הרעש עולה בשיעור של 2 dB(A) מעל לקריטריון, יכלול הטיפול התקנת מזגן בלבד.
2. אם מפלס הרעש החזוי מחוץ למבנה קולט הרעש עולה בתחום הנע בין 2 dB(A) לבין 5 dB(A) מעל לקריטריון, יכלול הטיפול התקנת מזגן והחלפת חלונות הזזה בחלונות ציריים.
3. אם מפלס הרעש החזוי מחוץ למבנה קולט הרעש עולה ביותר מ-5 dB(A) מעל לקריטריון המותר לקולט, יבוצע טיפול אקוסטי במעטפת המבנה אשר יבטיח כי מפלס הרעש המחושב בחדר כשפתחיו סגורים לא יעלה על 40 dB(A). לעניין זה "חדר" הנו חדר מגורים או חדר שינה.

מדידות מפלסי רעש רקע קיים יבוצעו במשך 15 דקות לפחות, באמצעות מכשור תקני ומכיל מסוג 2 (Type2), או מדויק יותר על פי התקן הבין-לאומי IEC 651.

מיקרופון המדידות יוגן בפני השפעת הרוח ויוצב לכיוון קבלת מפלס הרעש המרבי.

המדידות האקוסטיות באזור הדרך המתוכננת יבוצעו לפי השיטות הבאות:

1. באזור סלילת הדרך החדשה יבוצעו מדידות רעש רקע קיים ליד הקולטים העיקריים. רצוי גם לערוך בדיקת התקדמות הרעש מהכביש המתוכנן לאזורים הנבדקים, כדי לקבוע את השפעת חיפוי הקרקע על הפחתת מפלסי הרעש.
2. מדידות מפלסי הרעש מדרך קיימת לפני השינוי יבוצעו בשיטה שתאפשר קביעת מפלסי רעש תחבורה בשעת שיא רעש ליד קולטי הרעש הקריטיים, תוך עריכת מפקד תחבורה לצורך כיול תכנית חיזוי רעש התחבורה.

השילוב של מדידות רעש ומפקד התחבורה יאפשר כיול תכנית המחשב לכל הגורמים המשפיעים על התקדמות גלי רעש התחבורה מהדרך אל הקולטים, כגון חיפוי וטופוגרפיית הקרקע, מבנים בדרך וכו'.

רצוי לערוך את כיול התכנית לחיזוי רעש עבור הקטעים האופייניים של הדרך המיועדים לשינוי מהותי.

# 9. תכנות מחשב לחיזוי רעש תחבורה

המשרד לאיכות הסביבה אימץ מודלים של משרד התחבורה האמריקני - (FHWA- Federal Highway Administration) לחיזוי רעש תחבורה בישראל.

חיזוי רעש התחבורה מבוסס על עקרון התפשטות גלי קול מתחבורה בתנועה חופשית הזורמת בדרך הבין-עירונית, המתנהג כמקור רעש קווי.

עד לאחרונה נמצאה בשימוש רחב תכנת חיזוי Stamina 2, וכעת אומצה על ידי הוועדה הבין-משרדית תכנת חיזוי TNM.

שתי התכנות מבוססות על מאפיינים סטטיסטיים של הספקי רעש המוקרנים מכלי רכב.

## 9.1 בסיס עיוני לחיזוי רעש התחבורה באמצעות תכנת Stamina 2

תכנת המחשב Stamina 2 מבוססת על מודל התנועה החופשית בכביש בין-עירוני. את מפלס הרעש שווה הערך,  $Leq$ , עבור סוג כלי רכב  $i$  ניתן לחשב לפי הנוסחה:

$$Leqhi = Lwei + 10 \lg \left[ \frac{\pi Q_i d o}{V_i} \right] + 10 \lg \left[ \frac{d o}{d} \right]^{1+a} + 10 \lg \left[ \frac{\phi(\theta_1, \theta_2)}{\pi} \right], dB(A)$$

כאשר:

$Leqhi$  - מפלס הרעש שווה הערך,  $Leq$ , שנגרם במשך שעה אחת עקב תנועת כלי הרכב מקבוצת "i"  
 $Lwei$  - מפלס הספק של קבוצת כלי רכב "i",  $dB(A)$

בתכנת STAMINA 2 מוגדרים ערכי  $Lwe$  עבור שלוש קבוצות של כלי הרכב:

1. כלי רכב קלים - מכוניות פרטיות, טנדרים, מוניות.
2. משאיות ואוטובוסים עד 12 טונות.
3. משאיות מעל 12 טונות ו/או משאיות עם פתח פליטת גזי מנוע עליון.

$Q_i$  - נפח כלי רכב מקבוצת "i", הנע בכביש במשך שעה אחת, כלי"ר לשעה  
 $d$  - מרחק הנוצר בין מרכז מסלול התנועה לבין נקודת המדידה של מפלס הרעש, מ'  
 $d_o$  - מרחק הייחוס לחישובים אקוסטיים:

$$d_o = 15m$$

$V_i$  - המהירות הממוצעת של תנועת כלי רכב בקבוצה "i", ק"מ לשעה  
 $\alpha$  - פרמטר המתאר את השפעת בליעת הקרקע על התפשטות גלי רעש:  
 $\alpha = 0$  - קו התקדמות גלי רעש אינו עובר בסמוך לקרקע ו/או לקרקע מחזירה  
 $\alpha = 0.5$  - קו התקדמות גלי רעש עובר בסמוך לקרקע בולעת  
 $\phi(\theta_1, \theta_2)$  פונקציית מיקום של אלמנטי הכביש, המחושבת לפי זווית  $\theta_1$  ו-  $\theta_2$  של קצות האלמנט כלפי קולט הרעש.

מפלס הספק הרעש המוקרן על ידי כלי הרכב בשלוש הקבוצות יחושב לפי הנוסחה:

$$L_{we} = C_o + C_1 \lg V + 0.115 S^2$$

כאשר:

$C_o, C_1$  - מקדמים  
 $s$  - סטיית התקן  
 $V$  - מהירות התנועה

ערכי המקדמים וסטיית התקן עבור סוגים שונים של כלי הרכב מוצגים בטבלה 9.1.

### טבלה 9.1 – מאפייני ההספק האקוסטי של כלי הרכב

מקדמים וסטיית התקן			סוג כלי רכב
s	C1	C0	
2.5	38.05	4.80	מכוניות
3.37	33.91	22.06	עד 12 טונות
2.84	24.56	42.63	מעל 12 טונות

## 9.2 בסיס עיוני לחיזוי רעש תחבורה באמצעות תכנת TNM

תכנת TNM, כמו תכנת Stamina 2, מבוססת על מודל אנרגטי של התפשטות גלי רעש מתנועה חופשית של התחבורה בדרכים בין-עירוניות.

תכנת TNM מבוססת על מידע אקוסטי שנצבר במחקרים שנערכו בארצות הברית [14,15] בנוגע למאפייני תחבורה נוספים, אשר לא נלקחו בחשבון בפיתוח תכנת Stamina 2:

1. האטה והאצה של כלי רכב.
2. מידע על אוטובוסים ואופנועים כקבוצות כלי רכב נפרדות.
3. בסיס המאפיינים האקוסטיים של סוגים שונים של חיפוי קרקע.
4. השפעת שיפוע הכביש.
5. השפעה של חיפוי הקרקע.
6. גבהים אופייניים של כלי רכב הם 1.5 מ' לכל סוגי כלי הרכב, למעט משאיות כבדות מעל 12 טונות שגובהן נקבע ל-3.66 מ'.
7. בסיס הנתונים האקוסטיים והחישובים מתבצע בפסי שליש אוקטבה.

מפלס הרעש שווה הערך השעתי מחושב לפי הנוסחה:

$$L_{eq}(1H) = L_{Ei} - 10 \lg \left( \frac{Q_i}{V_i} \right) + 10 \lg \left[ \left( \frac{15}{d} \right) \left( \frac{\phi}{180} \right) \right] - A_s - 13.2, dB(A)$$

כאשר:

- $L_{Ei}$  - מפלס הרעש האנרגטי מכלי רכב מקבוצת  $i$ , dB(A)
- $Q_i$  - נפח התנועה של כלי רכב מקבוצת  $i$
- $V_i$  - מהירות התנועה של כלי רכב מקבוצת  $i$ ,  $m/sec^{-1}$
- $d$  - המרחק מנקודת הבדיקה עד לדרך, מ'
- $\phi$  - "זווית הראייה" של הדרך מנקודת הבדיקה
- $A_s$  - הפחתת הרעש הנגרמת על ידי שינוי טופוגרפיה ומתרסים למיניהם, dB(A)

### 9.3 חיזוי הפחתת רעש התחבורה באמצעות מחסומים אקוסטיים

חישוב הפחתת רעש על ידי מתרס רעש מבוסס על שינוי בדרך ההתפשטות של גלי רעש. השינוי מחושב לפי הנוסחה:

$$\delta = A + B - d$$

כאשר:

- A - המרחק המינימלי בין מקור הרעש לבין קדקוד מתרס הרעש
- B - המרחק המינימלי בין קדקודי מתרס הרעש לבין קולט הרעש
- d - המרחק בין מקור הרעש וקולט הרעש

הפחתת הרעש הנלקחת בחשבון מוגבלת ל-20 dB(A), וזאת עקב החזרות גלי רעש מהאטמוספירה והקרקע.

הערך המינימלי של הפחתת מפלס הרעש על ידי המתרס הנו:

$$\delta L = 5 \text{ dB(A)}$$

ערך זה מושג כאשר הקו המקשר את מקור הרעש והקולט נוגע בקדקוד המתרס. הפחתת מפלס הרעש מחושבת בתכנית באמצעות הנוסחה:

$$\delta L = 0$$

$$N \leq -0.2$$

$$\delta L = 20 \lg \left[ \frac{\sqrt{(2\pi N)}}{\tan \cdot h \cdot \sqrt{(2\pi N)}} \right] + 5$$

$$0.2 \leq N \leq 0$$

$$\delta L = 20 \lg \left[ \frac{\sqrt{(2\pi N)}}{\tan \cdot h \cdot \sqrt{(2\pi N)}} \right]$$

$$0 \leq N \leq 5.03$$

כאשר N - מספר פרינל:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda}$$

כאשר  $\lambda$  - אורך הגל.

החישוב של הפחתת מפלס הרעש על ידי המתרס ב-dB(A) מתבצע בנוסחאות הנייל, בתדירות של Hz 500.

תוצאות החישובים מראות על התאמה טובה בין dB(A) ו-Hz 500, כאשר החישוב ב-Hz 500 מספק ערך הפחתת מפלס רעש נמוך יותר מאשר ב-dB(A).

חיזוי מפלסי הרעש מבוסס על חלוקת הדרך לקטעים.

לכל קטע נקבעות קואורדינטות של הקצוות, ועל ידי כך מחשבת התכנית את מיקום הקטע, אורכו ושיפועו במערכת.

בשלב השני מוינים את התכנית בנתוני תנועה, לפי שלושה סוגי כלי רכב שתוארו לעיל.

קואורדינטות קולטי הרעש נקבעות בדומה לקטעי הכביש, כאשר גובה  $Z$  נקבע כגובה מרכז החלון בקומה העליונה:

1. עבור הקומה הראשונה - גובה הקרקע, בתוספת 2.0 מ'
2. עבור כל קומה נוספת בבית מגורים - תוספת של 3 מ'
3. עבור הקומה הראשונה של בניין ציבורי – 3 מ'
4. עבור כל קומה נוספת בבניין ציבורי - תוספת של 4 מ'



# 10. חיזוי רעש מדרכים

## בין-עירוניות

### 10.1 חיזוי רעש מדרך קיימת

את חיזוי הרעש מדרך קיימת מבצעים בכמה שלבים:

1. מבצעים מדידות רעש מדרך קיימת, תוך מפקד התחבורה לפי חמישה סוגי כלי הרכב שתוארו לעיל (בתכנת מחשב).

2. מבצעים חיזוי רעש מהדרך בנקודת המדידה, על פי תוצאות מפקד התחבורה.

3. על סמך תוצאות המדידות והחיזוי מחשבים את ערכי הכיול של תכנת המחשב.

את מדידות מפלסי הרעש שווה הערך, Leq, יש לבצע באמצעות מד מפלסי קול תקני, Type 2 לפחות, על פי התקן IEC 651.

את מיקרופון המדידות יש להציב בגובה של 1.5 מ' מפני הקרקע, כאשר בתי המגורים הם בעלי קומה אחת.

כאשר המבנה כולל כמה קומות יש לבצע את מדידות מפלסי רעש התחבורה בשתי הקומות התחתונות, בקומת ביניים ובקומה העליונה.

למדידות רעש ומפקדי תחבורה חשיבות מכרעת בחיזוי רעש התחבורה, היות שהם מאפשרים לכייל את תכנת המחשב ועל ידי כך להגיע לדיוק מרבי בחיזוי מפלסי רעש התחבורה.

על סמך בדיקת תכנית שינוי הדרך בוחרים קטעי דרך אופייניים, ועבור כל אחד מהם קבועים כדלקמן:

1. עמדת המדידה בקרבת הכביש, שבה יתבצעו מדידת הרעש ומפקד התחבורה במשך כל שעות הבדיקה כדי לקבוע את שעת השיא.

2. נבחרים מבנים הקרובים לכביש והמאפיינים את האזורים הנבדקים.

מדידות מפלסי הרעש Leq, בכל נקודה, מתבצעות במשך שעה אחת.

בשיטה הקונבנציונלית יש להעמיד ליד כל מבנה בודק מוסמך לביצוע ממושך של מדידות הרעש.

בדיקות רעש כאלו מצריכות מספר רב של בודקים ומכשירי מדידות, ועלותן גבוהה ביותר.

בשיטה המוצעת להלן ניתן להקטין במידה משמעותית את מספר הבודקים והמכשירים.

השיטה כוללת כמה מהלכים:

1. את קטע הכביש הנבדק מחלקים לקטעים עם נפחי תחבורה ומהירות תנועה דומים.

2. בכל קטע כביש בוחרים נקודת ייחוס שבה ניתן לערוך מפקד תחבורה ולבצע מדידות מפלסי רעש תחבורה כל 15 דקות, ללא השפעה של טופוגרפיית האזור.

3. במקביל לבדיקות התחבורה בנקודת הייחוס מבצעים מדידות רעש במשך 15 דקות ליד כל המבנים המייצגים, שבנוגע להם הוחלט לבצע כיול תכנת המחשב.

חיזוי רעש מדרך קיימת עורכים באמצעות תכנית TNM או תכנה מקובלת אחרת, וזאת על בסיס נתונים על מהירות התנועה ונפחי התנועה של התחבורה המסופקים על ידי מתכנן תחבורה מוסמך.

חיזוי רעש תחבורה עורכים בתנאים הבאים:

1. נפחי התנועה, הרכבה ומהירותה נקבעים על ידי מתכנן הכביש על סמך Highway Capacity Manual.
2. רמת שירות C בכיוון ראשון ורמת שירות B בכיוון השני, וחישוב חוזר לפי רמת שירות B בכיוון הראשון ורמת שירות C בכיוון השני.

מפלסי הרעש בשעת שיא ליד המבנים הנבדקים מחושבים לפי הנוסחה:

$$Leq_{(i \max)} = Leq_{(i, Ti)} + (Leq_{(ref, \max)} - Leq_{(ref, Ti)})$$

כאשר:

- $Leq(i, Ti)$  - מפלס הרעש שווה הערך שנמדד בנקודה i בפרק זמן  $Ti$
- $Leq(ref, \max)$  - מפלס הרעש שווה הערך שנמדד בשעת שיא בנקודת ייחוס
- $Leq(ref, Ti)$  - מפלס הרעש שווה הערך שנמדד בנקודת הייחוס ליד מבנה i

## 10.2 חיזוי רעש מדרך חדשה

התחבורה מהווה מקור רעש סביבתי עיקרי, ולכן סלילת דרכים חדשות משנה במידה משמעותית את רעש הרקע הקיים.

לאור זאת, חשיבות מיוחדת מקבלת הדרישה של המשרד לאיכות הסביבה למדידת מפלסי רעש רקע קיים, הקובע את הקריטריון למפלס הרעש המרבי המותר.

מסיבה זו יש להקפיד על ביצוע מקיף של המדידה, במשך שעות היום, ובמיוחד בשעת שיא התחבורה, על פי התכנון של מתכנן התחבורה.

במצבים מסוימים ניתן לוותר לעתים על מדידות רעש רקע:

1. מצב שבו הדרך אינה קיימת כלל, והיא עוברת בשטח בור או בשטח חקלאי וכד', כאשר גם קולטי הרעש הם מבנים עתידיים שטרם נבנו.

2. מצב שבו בסביבת התכנית יש דרכים ומקורות משמעותיים של רעש רקע ו/או כאשר מהות התכנית היא הרחבה ותוספת לכביש קיים, אשר מחייבות הליך סטטוטורי.

מקדם בליעת הקרקע משפיע במידה רבה על תוצאות חיזוי רעש התחבורה במתחם הנבדק, ולפיכך מומלץ לערוך בדיקות השפעת חיפוי הקרקע על התפשטות גלי רעש מהדרך החדשה אל הקולטים.

# 11. מדידות רעש רקע

## מדרכים

### 11.1 מדידות רעש תחבורה מדרך קיימת

מדידות מפלסי רעש שווה ערך, Leq, יבוצעו לפי השיטה הבאה:

1. כל שימושי הקרקע וייעודיה יחולקו לשתי קבוצות מבנים:
  - 1.1 "מבנה א' - בניין המשמש כבית חולים, בית החלמה, בית הבראה, בית אבות או בית ספר".
  - 1.2 "מבנה ב' - בניין באזור מגורים בהתאם לתכנית לפי חוק התכנון והבנייה".
2. מדידות רעש תחבורה בכל קבוצת שימושי קרקע יבוצעו כדלקמן:
  - 2.1 יבוצעו מדידות רעש תחבורה בנקודת ייחוס שתמוקם בקרבת הכביש, וזאת במקביל למפקד התחבורה לפי שיטת החיזוי.
  - 2.2 מדידות הרעש ומפקד התחבורה יבוצעו כל 15 דקות לפחות.
  - 2.2 במקביל למדידת הרעש ומפקד התחבורה, יבוצעו, על פי התקן, מדידות רעש ליד המבנים האופייניים הקרובים לכביש.
  - 2.3 המדידות יבוצעו כל 15 דקות. המידע שיתקבל ישמש למטרות כיוול תכניות חיזוי הרעש.
  - 2.4 מיקרופון המדידות יוגן בפני השפעת רוח באמצעות מגן רוח, ויועמד במרחק 1 מ' ממעטפת המבנים ובגובה מרכז החלון בקומה הרגישה לרעש.
  - 2.5 ייערך יומן המדידות ובו פירוט מקורות רעש אופייניים וחריגים.
  - 2.6 המיקרופון יכוון כך שתתקבל הקריאה הנכונה.
3. מדידות רעש תחבורה קיימת ליד ייעודי הקרקע יבוצעו בשיטה הבאה:
  - 3.1 יבוצעו מדידות רעש תחבורה בנקודת ייחוס שתמוקם בקרבת הכביש, וזאת במקביל למפקד התחבורה, לפי שיטת החיזוי.
  - 3.2 מדידות הרעש ומפקד התחבורה יבוצעו כל 15 דקות לפחות.
  - 3.2 במקביל למדידות רעש ומפקד תחבורה יבוצעו, על פי התקן, מדידות רעש ליד אזורים ומבנים אופייניים הקרובים לכביש.
  - 3.3 מיקרופון המדידות יוגן בפני השפעת הרוח באמצעות מגן רוח, ויועמד במרחק של 1 מ' ממעטפת המבנים ובגובה של 1.5 מ' מעל פני הקרקע.
  - 3.4 ייערך יומן המדידות ובו פירוט מקורות רעש אופייניים וחריגים.
  - 3.5 המיקרופון יכוון כך שתתקבל הקריאה הנכונה.

## 11.2 מדידות רעש רקע קיים לפני סלילת דרכים חדשות

מדידות רעש רקע קיים באזור סלילת דרך חדשה יבוצעו לפי השיטה הבאה:

1. כל שימושי הקרקע וייעודיה יחולקו לשתי קבוצות מבנים:
  - 1.1 "מבנה א' – בניין המשמש כבית חולים, בית החלמה, בית הבראה, בית אבות או בית ספר".
  - 1.2 "מבנה ב' – בניין באזור מגורים בהתאם לתכנית לפי חוק התכנון והבנייה".
2. בשימושי הקרקע ובייעודיה יוגדרו אזורים אופייניים לפי הקריטריונים:
  - 2.1 קטע אופייני של הכביש
  - 2.2 גובה מבנים
  - 2.3 מחסומי רעש קיימים כמו מבנים וגבעות
3. מדידות רעש קיים יבוצעו בשעות היום ליד שימושי הקרקע וייעודיה, הקרובים לכביש המתוכנן.

# 12. אמצעים להפחתת

## רעש תחבורה

המלחמה ברעש תחבורה חייבת להתנהל בכמה חזיתות בעת ובעונה אחת. כל ניסיון להשתמש רק בסוג אחד של אמצעים אקוסטיים גורם ליעילות נמוכה ולהוצאות כספיות מיותרות.

### 12.1 המרחק כאמצעי להפחתת רעש

התרחקות ממקור רעש קווי, כפי שמתנהג כביש תחבורה, גורמת להפחתת רעש בשיעור של 3 dB(A) לכל הכפלת המרחק.

להפחתה זו יש להוסיף הפחתה נוספת הנגרמת על ידי בליעת הקרקע ובליעה מולקולרית באוויר.

קרקע בולעת עשויה להיות גורם משמעותי מאוד בהפחתת רעש התחבורה, המגדיל את הפחתת מפלס הרעש ל- 4.5 dB(A) על כל הכפלת המרחק מהכביש. השימוש בהתרחקות מהכביש כאמצעי הפחתת רעש תחבורה קשה ליישום בישראל, עקב חוסר שטחים לבנייה והתקרבותם המתמדת לכבישים עירוניים ובין-עירוניים.

### 12.2 הפחתת רעש באמצעות צמחייה

צמחייה עשויה לשמש אמצעי סביבתי יעיל להפחתת רעש התחבורה.

במחקר שנערך בישראל [13] נקבע שהצמחייה בישראל (עצים בשילוב שיחים) גורמת להפחתת מפלס הרעש בשיעור של 0.1÷0.3 dB(A) למטר עומק.

לפיכך, ניתן להבטיח הפחתת רעש של 5÷6 dB(A) על ידי שילוב עצים ושיחים בעומק 20 מ' לפחות.

הבעיה העיקרית בשימוש בצמחייה כאמצעי הפחתת רעש היא הזמינות הנמוכה של האמצעי עצמו. בדרך כלל צמיחת חגורות העצים והפיכתן למתרס אקוסטי נמשכת על פני תקופה של כמה שנים, בו בזמן שהפתרונות האקוסטיים נדרשים מידית. הבעיה העיקרית היא שפתרון זה מצריך שטח רב וטיפול שותף.

ניתן להעריך את הפחתת מפלס הרעש על ידי הצמחייה הכוללת עצים בשילוב שיחים באמצעות הנוסחה:

$$\delta L = 0.54GS\sqrt{f}, \text{ dB/m}$$

כאשר:

f - התדירות, Hz

S - שטח משטחי הצמחייה

G - מקדם צפיפות הצמחייה

$$G = (1 \div 2) \cdot 10^{-3}$$

### 12.3 אספלט שקט להפחתת רעש תחבורה

"אספלט שקט" הנו חיפוי הכביש בתערובת בעלת נקבוביות גבוהה הגורמת לבליעת האנרגיה האקוסטית.

היתרונות של האספלט השקט הם כדלקמן:

1. מניעת החלקה בכביש עקב ניקוז משופר של המים מהכביש.
2. מניעת סנוור והתזת מים בגשם.
3. הפחתת מפלס הרעש המוחזר מהכביש בשיעור של  $3\div 4$  dB(A), עקב בליעת אנרגיית הרעש בתדירויות הבינוניות והגבוהות (500 ÷ 2000) Hz.

"האספלט השקט" יהיה אפקטיבי ויגרום להפחתת מפלסי רעש התחבורה ליד המבנים, כאשר הוא משמש אמצעי יחיד לפתרון הבעיה.

כאשר יעילות המחסום נמוכה מ-  $7$  dB(A) "האספלט השקט" עשוי להגדיל את הפחתת רעש התחבורה בשיעור של  $3$  dB(A), כאשר יעילות המחסום עולה על  $7$  dB(A) "האספלט השקט" אינו תורם להפחתה נוספת של רעש התחבורה.

### 12.4 מחסומים להגנה בפני רעש תחבורה

מחסום להפחתת רעש משמש חיץ אחרון המגן על המבנה מפני גלי רעש התחבורה המתפשטים מהכביש.

קיימים כמה סוגים של מחסומי רעש:

1. קירות מסך מחומרים שונים
2. סוללות עפר
3. מבנים למיניהם
4. שינויי טופוגרפיה או שיקוע הכביש היוצר קיר תומך אקוסטי

הפחתת מפלס הרעש נגרמת על ידי המחסום עקב תופעת דיפרקציה בצדי האלמנט, וזאת כלפי האזורים אשר אינם "נראים" ממקור הרעש, או כאשר לא קיים קשר עין בין המקור לבין הקולט.

התופעות הנגרמות על ידי מחסום רעש העומד בדרך ההתפשטות של גלי הרעש מוצגות בתרשימים 12.1 ו-12.2.

כאשר בדרכם של גלי רעש נמצא מחסום אקוסטי, ניתן להבחין בכמה תופעות:

1. גלי הרעש הפוגעים במחסום מוחזרים לכיוון המקור, ומעלים את רמות הרעש בסביבתו.

כושר הבידוד האקוסטי של המחסום עצמו עולה מעל  $25$  dB, ויעילותו אינה מושפעת מחדירת הרעשים דרך המחסום עצמו.

2. גלי רעש אשר אינם פוגעים במחסום מתפשטים ללא הפרעה, בהתאם לחוקי ההתפשטות של גלי קול.
3. גלי רעש אשר פוגעים בקדקוד המחסום מאבדים חלק מהאנרגיה, עקב תופעת הדיפרקציה.

כתוצאה מכל התהליכים שפורטו לעיל, נוצר מאחורי המחסום צל אקוסטי שבו רמות הרעש יהיו נמוכות בהשוואה עם המצב ללא המתרס.

את הפחתת רעש התחבורה על ידי מחסומים אקוסטיים ניתן להעריך באמצעות הנוסחה:

$\delta L = 6 \lg \delta + 15, \text{dB(A)}$	$0.05 \leq \delta \leq 50$
$\delta L = 5 (1 + 7\delta)$	$\delta \leq 0.05$

שיטת הקביעה של המאפיינים ההנדסיים של מתרסי רעש מוצגת בתרשים 12.4.

החזרת גלי קול על ידי מתרסי רעש עלולה להגדיל את רמות הרעש באזורים הממוקמים מול מתרס הרעש. כמו כן, היעילות של מתרס הרעש עצמו נפגעת במידה מסוימת.

טיפול אקוסטי בולע בדופן מתרס הרעש הפונה אל המקור עשוי להגדיל במידה משמעותית את יעילות המתרס, וגם למנוע הצטברות רעש באזורים הנמצאים מול האלמנט.

בתרשים 12.5 מוצגת תוספת בהפחתת רעש תחבורה על ידי המתרס הבולע.

כפי שניתן ללמוד מהנתונים, כושר הפחתת הרעש של המתרס עולה בשיעור של  $(2 \div 4) \text{ dB(A)}$  כאשר דופן מקור הרעש משמשת כאלמנט בליעה אקוסטית.

תקן אירופי 3 - 1 - 1793 prEN {16} מגדיר את שיטת הדירוג של מתרסי רעש על פי תכונות הבליעה והבידוד האקוסטיים.

בחלק 3 של התקן מוגדר ספקטרום ערכים יחסיים בשלישי אוקטבה, המתאר את רעש התחבורה (ראה טבלה 12.1)

### טבלה 12.1 – ספקטרום רעש תחבורה אופייני

f.Hz	Li, dB(A)
100	-20
125	-20
150	-18
200	-16
250	-15
315	-14
400	-13
500	-12
630	-11
800	-9
1,000	-8
1,250	-9
1,600	-10
2,000	-11
2,500	-13
3,150	-15
4,000	-16
5,000	-18

תקן 1793-1 prEN מגדיר את דירוג מחסומי הרעש על פי כושר הבליעה של פני המתרס הפונה לדרך.  
 ערך חד-מספרי המגדיר את כושר הבליעה של המתרס, מחושב על פי הנוסחה:

$$DL_a = -10 \lg \left[ 1 - \sum_1^{18} \alpha_{st} 10^{0.1Li} \right]$$

תקן 1793-2 prEN מגדיר את דירוג מתרסי הרעש על פי כושר הבידוד האקוסטי של פני המתרס הפונה לדרך.  
 ערך חד-מספרי המגדיר את כושר הבליעה של המתרס, מחושב על פי הנוסחה:

$$DL_R = -10 \lg \left[ \sum_1^{18} 10^{0.1Li} 10^{-0.1Ri} \right]$$

כאשר Ri - ספקטרום כושר הבידוד האקוסטי של המתרס האקוסטי

בטבלה 12.2 מוצג דירוג של מחסומי רעש בהתאם לכושר הבידוד והבליעה שלהם.

### טבלה 12.2 – דירוג מחסומי רעש תחבורה

DLR	דירוג בידוד	Dla	דירוג בליעה
לא נבדק	B0	לא נבדק	A0
<15	B1	<4	A1
15-24	B2	4-7	A2
>24	B3	8-11	A3
		>11	A4

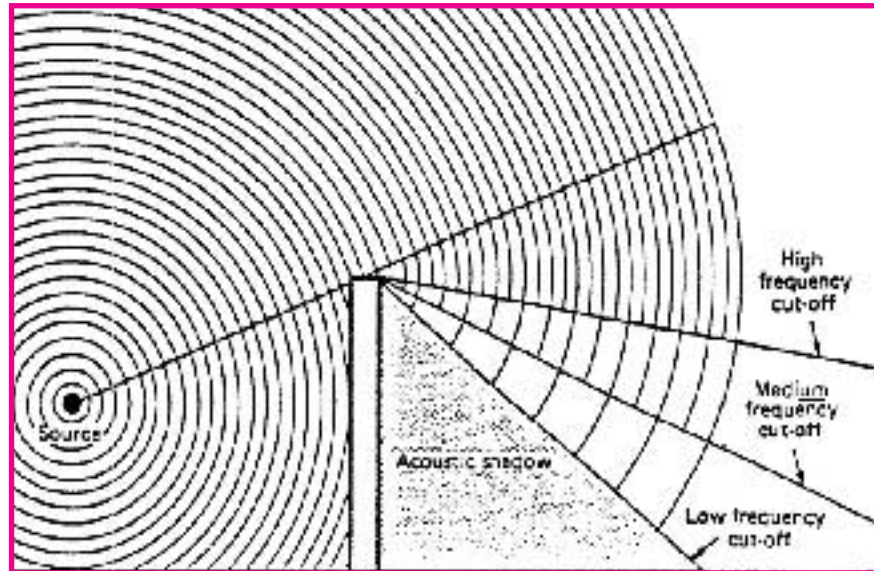
ניתן להפחית את השפעת ההחזרות ממתרס רעש על ידי בנייתו בזווית של עד  $10^0$  כלפי מעלה (ראה תרשים 12.7).

היעילות של מתרסי רעש קטנה עם הגבלת אורכם. בתרשים 12.8 מוצגת השפעת "זווית הראייה" של מקור הרעש מנקודת הבקרה, המוגנת על ידי מתרס רעש באורך סופי.

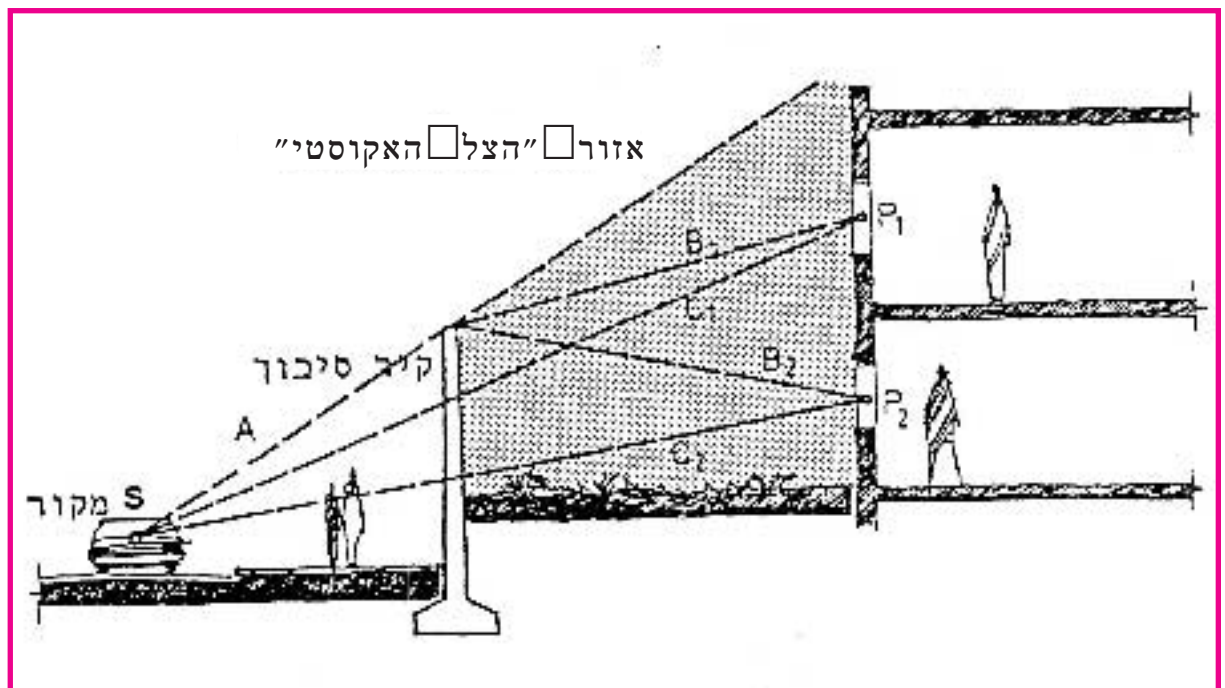
מבנים עשויים לשמש מתרסי רעש יעילים מאוד, אולם יעילותם מוגבלת עקב אורכם המוגבל.

את רוחב המבנה ניתן להוסיף לדרך הכוללת של התפשטות הגל בנוכחות מתרס רעש - ראה תרשים 12.4.

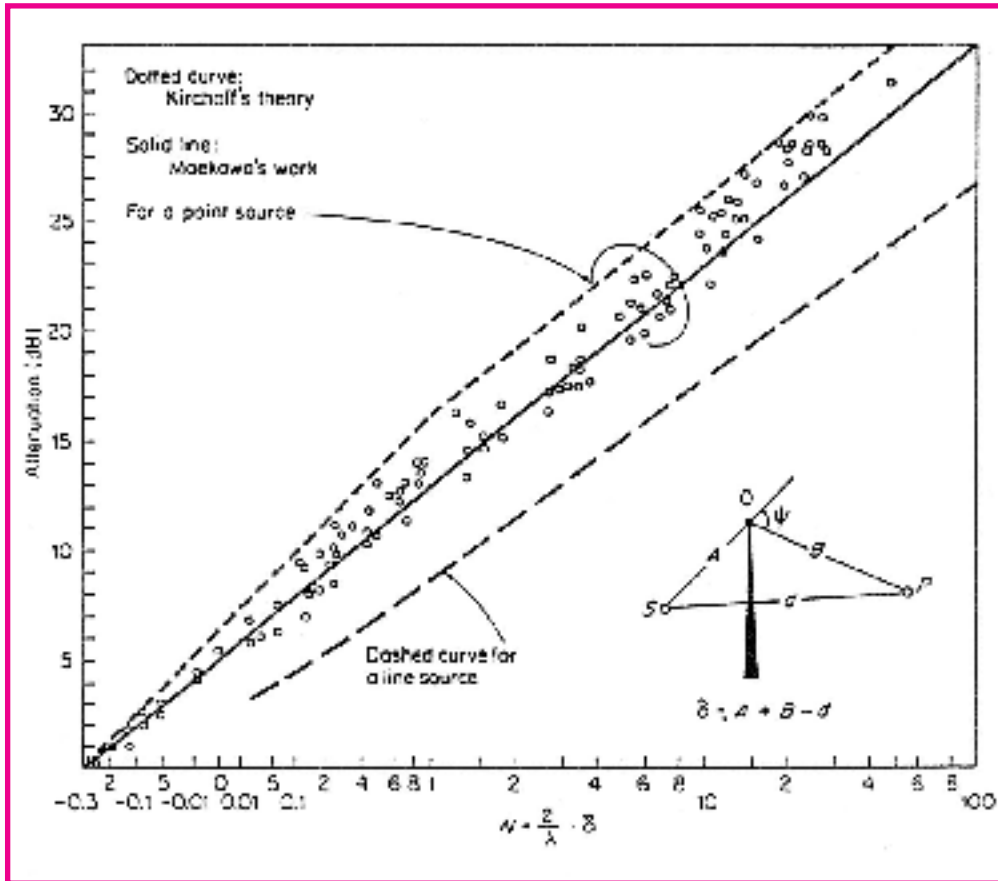
תרשים 12.1 – השפעת מתרס הרעש על התפשטות גלי הקול



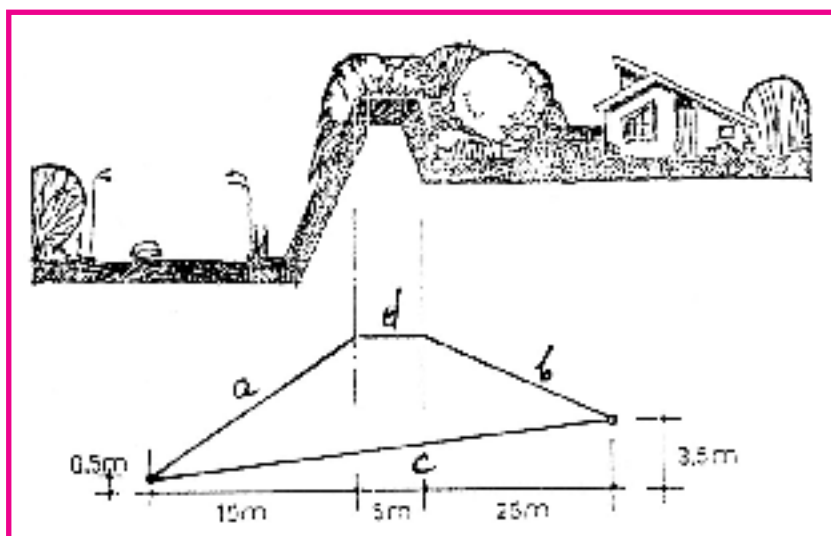
תרשים 12.2 – צל אקוסטי ממתרס הרעש



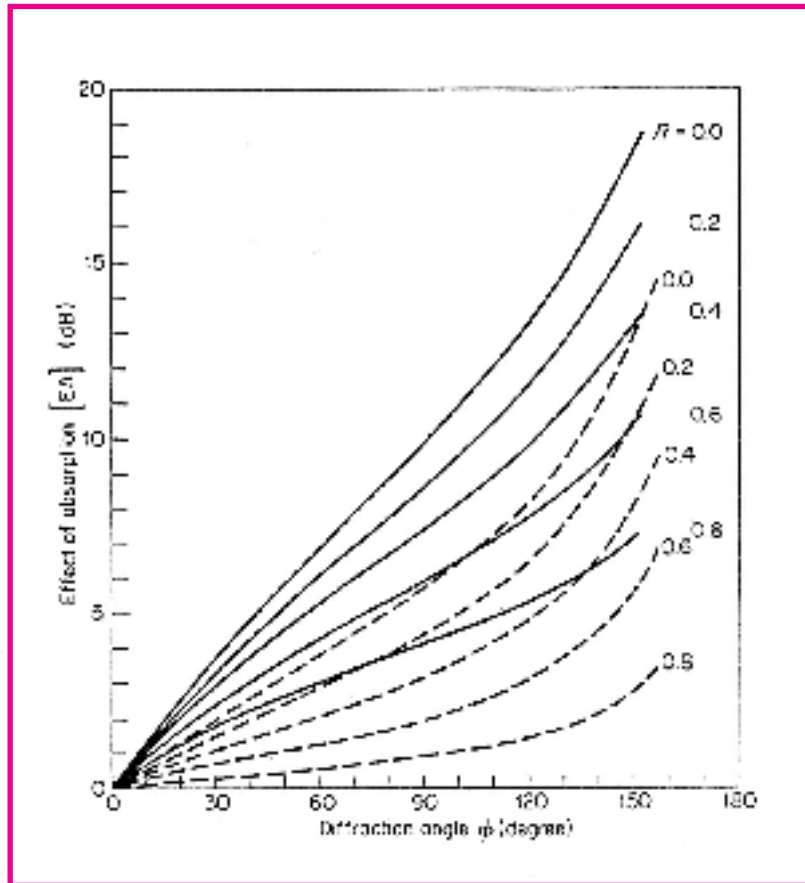
תרשים 12.3 - הפחתת רמת הרעש על ידי מתרס רעש



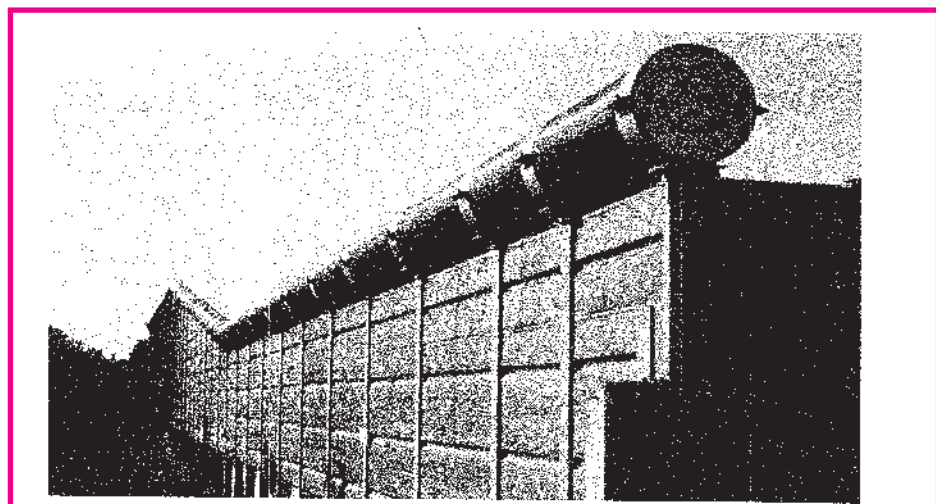
תרשים 12.4 - המאפיינים ההנדסיים של מתרסי רעש



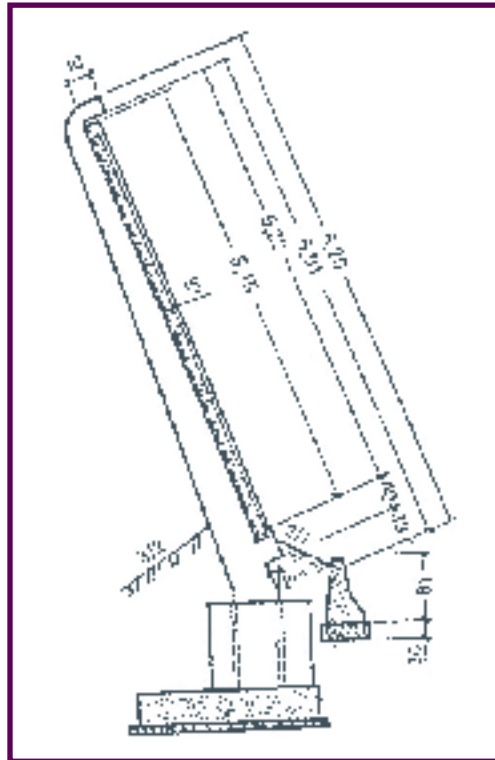
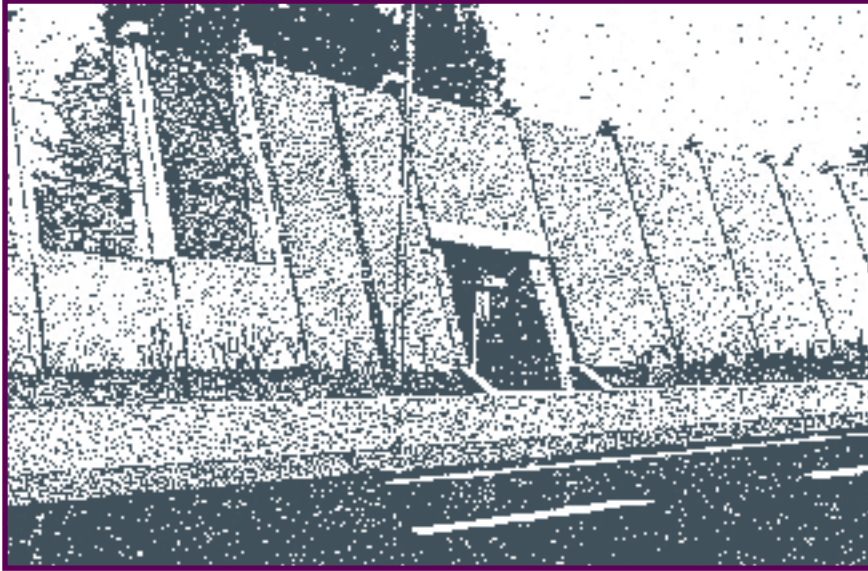
תרשים 12.5 - השפעת טיפול בולע על כושר הפחתת מפלס הרעש על ידי המתרס



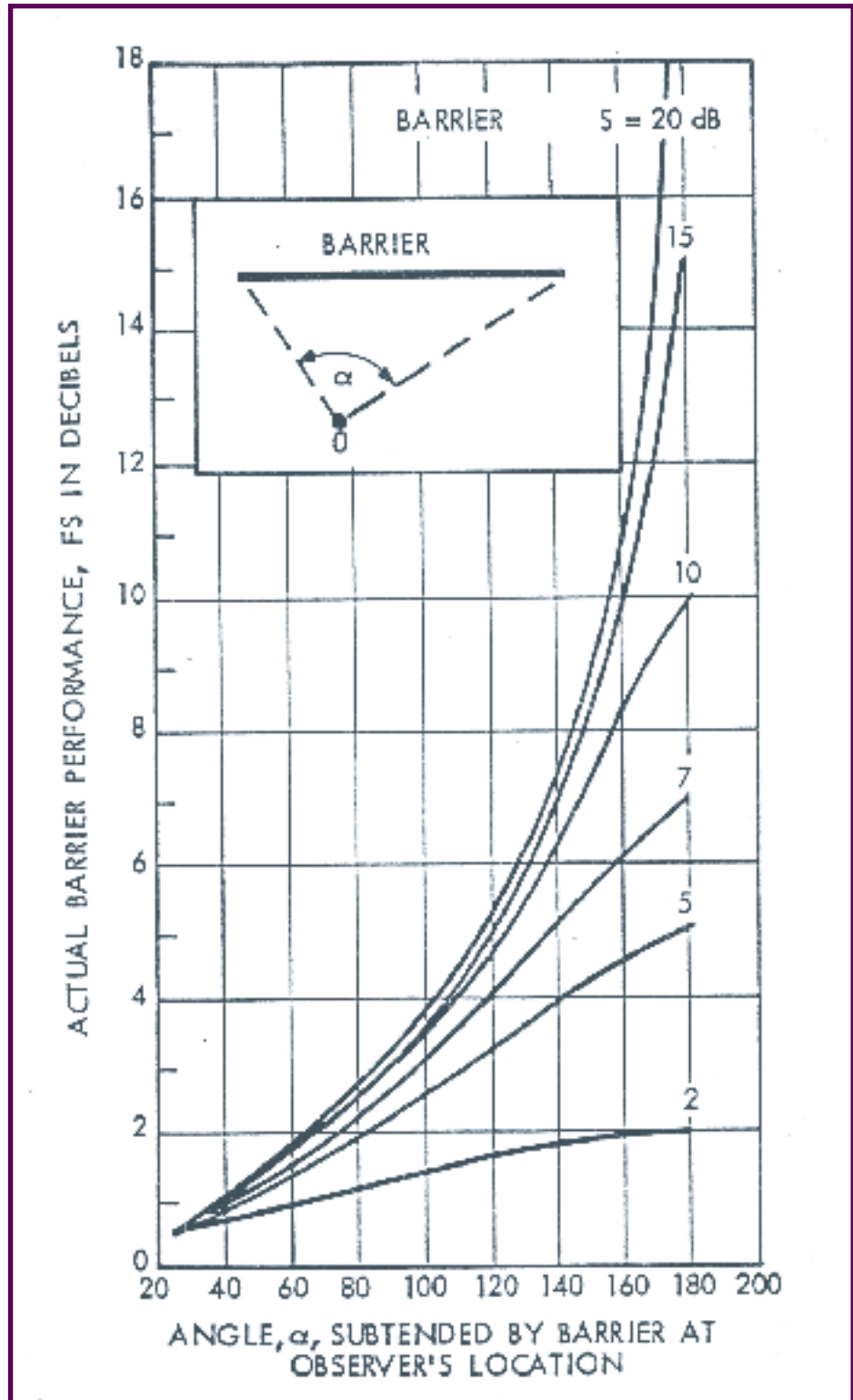
תרשים 12.6 - קדקוד בולע של מתרס להפחתת רעש תחבורה



תרשים 12.7 - מתרסי רעש בנויים בזווית, להקטנת השפעת החזרות



תרשים 12.8 - השפעת אורכו המוגבל של מתרס הרעש על יעילותו האקוסטית



## 12.4.1 קירות להפחתת רעש תחבורה

מתרסי רעש בנויים בדרך כלל מבטון מזוין או מבלוקים למיניהם, העוברים עיבוד ארכיטקטוני סביבתי של פני השטח.

מתרסי רעש יכולים להיבנות כקירות ישירים או בגאומטריה שונה כגון טרפז, גלים ואלמנטים בגבהים שונים, אשר אינם קטנים מהגובה המינימלי.

מתרסים ארוכים נבנים לעתים מאלמנטים טרומיים, אלמנטים שקופים, ובלבד שכושר הבידוד האקוסטי של המתרס לא יפחת מ-25 dB(A).

מתרסים אקוסטיים מקשיים הנפוצים בישראל מוצגים בתרשים 12.9, 12.10 ו-12.11.

## 12.4.2 סוללות עפר

סוללות עפר הן הפתרון היעיל והזול להפחתת מפלס הרעש על ידי מחסומים אקוסטיים.

החיסרון היחיד של סוללות העפר מתבטא בשטח הגדול הנדרש לבנייתן, אשר לא תמיד עומד לרשות המתכננים.

היעילות האקוסטית של סוללות עפר גבוהה יותר מאשר של המתרסים המקשיים, וזאת הודות לתכונות בליעה מסוימות של פני הסוללה, כולל הקדקוד (אדמה נקבובית המכוסה לעתים גם בצמחייה), ובמיוחד הודות לרוחב הסוללה.

השיפור בהפחתת מפלסי רעש התחבורה על ידי סוללת עפר לעומת קיר מקשי העשוי מחומרים שונים, מתבטא בשיעור של:

$$\delta L = (0 \div 3) \text{ dB(A)}$$

השיפוע המומלץ של דופןות הסוללה נע בגבולות:

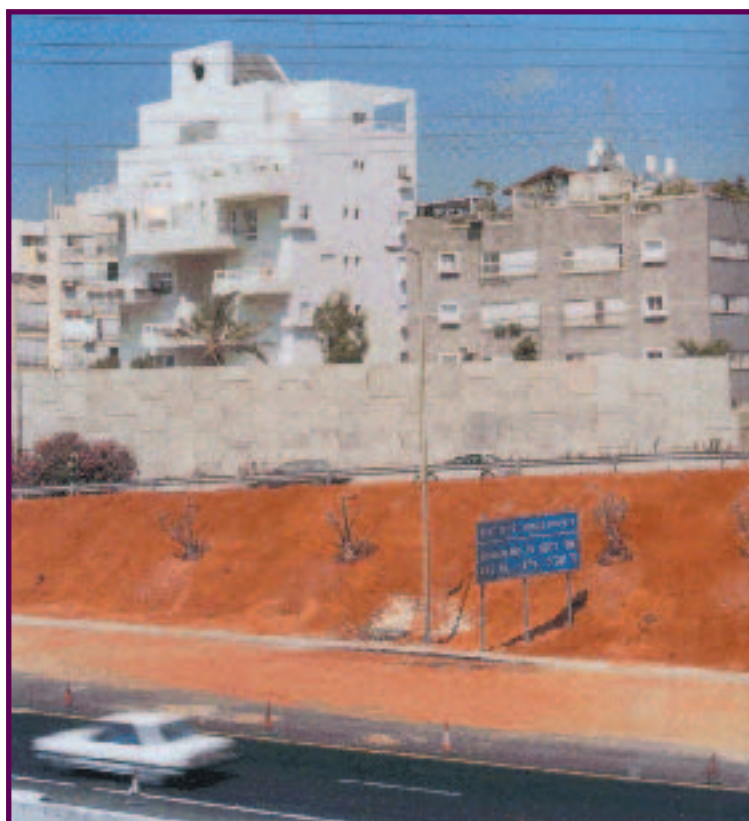
$$k = (1:2 \div 1:3)$$

עיקרי תכנון סוללות העפר מוצגים בתרשים 12.12.

סוללת עפר להפחתת רעש תחבורה מוצגת בתרשים 12.13.

ניתן לצמצם את שטחי סוללות העפר על ידי שילוב מתרסים אקוסטיים מקשיים או בניית קירות תומכים – ראה תרשים 12.14.

תרשים 12.9 – מתרסים אקוסטיים מקשיים הנפוצים בישראל



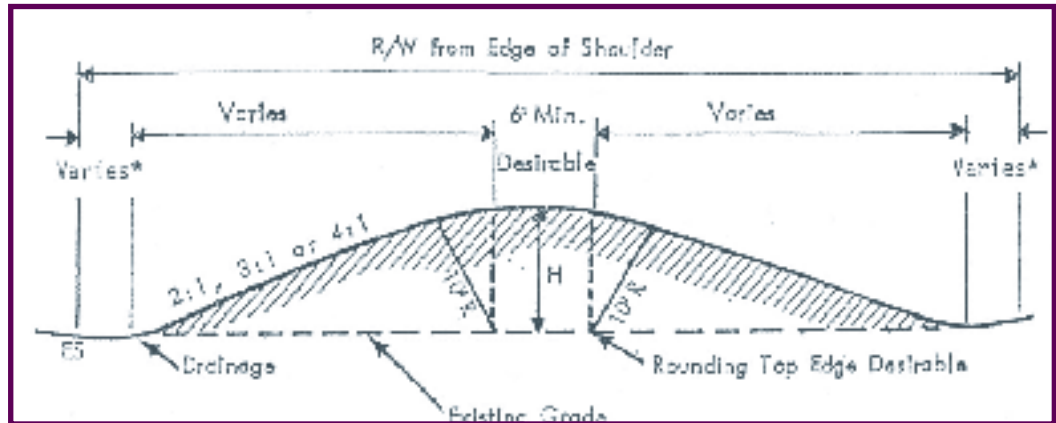
תרשים 12.10 – מתרס אקוסטי מבלוקים מקשיים  
להגנה בפני רעש תחבורה



תרשים 12.11 – מתרס אקוסטי מפלסטיק שקוף  
להגנה בפני רעש תחבורה



תרשים 12.12 - עיקרי תכנון סוללת עפר



תרשים 12.13 - סוללת עפר להפחתת רעש תחבורה



תרשים 12.14 - שילוב של סוללת עפר ומתרס מקשי בולע להפחתת רעש תחבורה



### 12.4.3 מתרסים אקוסטיים בולעים

מתרסים אקוסטיים בולעים יכולים להיות משני סוגים:

1. חיפוי אקוסטי בולע על מתרס רעש הבנוי מחומר מקשי.

2. מתרסים בולעים אשר כוללים מרכיבים העומדים בתנאים סביבתיים:

2.1 דופן מקשית מפח, ברזל או אלומיניום, פלסטיק, עץ או כל חומר אחר.

2.2 חומר בולע כמו צמר סלעים או צמר זכוכית או כל חומר אחר בעל תכונות בליעה אקוסטית.

2.3 לוח מחורר או כל חיפוי חיצוני המבטיח שטח פתוח של  $(25 \div 35\%)$ .

הצד הבולע של המתרס מופנה אל הכביש.

כושר הבידוד האקוסטי של מתרס בולע לא יפחת מ-25 dB.

השימוש במתרסים בולעים נחוץ למניעת החזרת גלי רעש בערים ולאורך כבישים בין-עירוניים, כאשר מבנים רגישים לרעש ממוקמים בשני עברי הדרך.

בתרשימים 12.15, 12.16 ו-12.17 מוצגים מתרסים אקוסטיים בולעים המיושמים בישראל.

### 12.5 שימוש במנהרות ובשיקוע הדרך

המנהרות הן האמצעי היעיל ביותר להפחתת רעש מהכביש, וזאת הודות לאטימות מוחלטת של רוב קטע הדרך.

המנהרות משמשות למניעת פיזור רעש מעורקי תחבורה בתוך ערים, באזורים שבהם צפיפות המגורים גבוהה ואינה מאפשרת שימוש באמצעי הפחתה אחרים.

שימוש במנהרות נעשה בדרך כלל בכניסה לערים, ברחובות הערים ובכניסה לחניונים ביתיים.

שיקוע הכביש משמש ליצירת מתרס אקוסטי להפחתת הרעש, כאשר קיים קושי בניצול מתרסים קונבנציונליים.

שיקוע הכביש בוצע בישראל בצומת הכפר הירוק ובצומת כפר שמריהו, כאשר האלטרנטיבה הייתה בניית גשרים גבוהים שהיו מהווים מקור רעש מטריד לשטחי מגורים נרחבים.

תרשים 12.15 – מתרס בולע משילוב אלומיניום  
מחורר וחומר בולע



תרשים 12.16 – מתרס בולע  
משילוב סרגלי עץ וחומר בולע



תרשים 12.17 – מתרס אקוסטי מקשי  
עם חיפוי מבטון נקבובי בולע



## 12.6 המעטפת החיצונית כאמצעי להפחתת רעש התחבורה

המעטפת החיצונית של בניין מהווה את המחסום האחרון המונע חדירת רעשים סביבתיים בכלל, ורעש תחבורה בפרט, אל תוך הבניין.

בין כל האמצעים להפחתת רעש התחבורה, המעטפת החיצונית היא היעילה ביותר, הודות לכושר הבידוד האקוסטי הגבוה במידה משמעותית מכושר הבידוד האקוסטי של האמצעים האחרים.

הקירות החיצוניים נבנים בדירות המגורים ובבניינים ציבוריים מבלוקי איטונג או בטון בעובי 20 ס"מ עם טיח משני הצדדים.

במקרים רבים, טיפול במעטפת חיצונית מוגבל באופן מעשי לשלב בניית המבנה. לכן, חשוב להבטיח טיפול מתאים במעטפת המבנה על ידי הוראות סטטוטוריות שיחייבו תכנון אקוסטי ובנייה בהתאם למפרטים הדרושים - הן בשלב אישור התכנית והן בשלב היתר הבנייה ואישור האכלוס. לאחר הבנייה - טיפול במעטפת, במיוחד כאשר מדובר במספר רב של יחידות דיור, עשוי להיות מורכב ויקר ביותר, ולעתים - בלתי אפשרי.

כושר הבידוד האקוסטי של קיר חיצוני גבוה מ- 45 dB, ולכן החלונות במבנה מהווים את נקודות התורפה העיקריות בהשגת כושר בידוד אקוסטי נדרש.

החלונות הסגורים מחייבים הבטחת אוורור או מיזוג אוויר של הדירה והמבנים.

כיום קיימים מפוחי אוורור אקוסטיים בעלי כושר בידוד רעש המגיע ל- 45 dB(A) - ראה תרשים 12.18.

באמצעות מפוחים אלו ניתן לאוורר את המבנה או הדירה ללא צורך בפתיחת החלונות.

המפוחים מאפשרים ויסות כמות האוויר הנדרשת, ולכן ניתן באמצעותם ליצור תנועת אוויר רצויה בכל כיוון.

בהנחה שמסת הקיר מחולקת באופן שווה על פני השטח, ניתן להעריך את כושר הבידוד האקוסטי מפני קול נישא באוויר כתלות בתדירויות, באמצעות הנוסחה:

$$R = 18 \lg m + 12 \lg f - 25, \text{ dB}$$

כאשר:

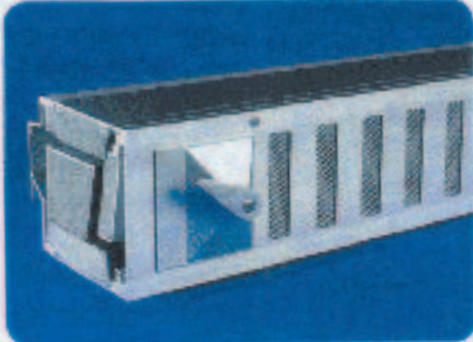
m - מסה שטחית,  $\text{kgm}^{-2}$

f - התדירות, Hz


ערכי אינדקס הבידוד האקוסטי של קירות מוצגים בטבלה 12.3.

תכונות כושר הבידוד של חלונות דומות לאלה של קירות ומחיצות, ולפיכך ניתן להשיג מהם בידוד אקוסטי גבוה, בדומה לקירות ומחיצות.


תרשים 12.18 – מאווררים אקוסטיים להרכבה במעטפת החיצונית של המבנה – מאפיינים טכניים



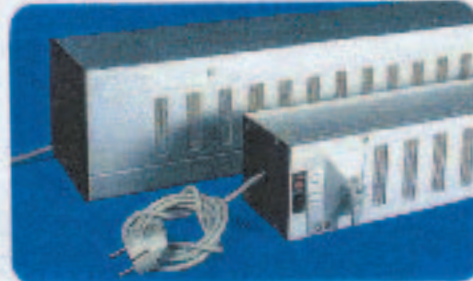
Model Z 100



Model Z 100 V



Model Z 150



Models ZU 101, ZB, ZE 101

**Materials and surfaces**  
 Compact housing of extruded aluminium.  
 Special cone absorbing, abrasion resistant foam material with  
 antibacterially treated and coated surface. Hardy, inflammable,  
 in accordance with building materials class B1, (EN 13501).  
 Anodizing finishes: E4 1 (natural colour)  
 U-cooler 5 (dark bronze)  
 Lacquer finish: white (RAL 9010)

### Models 100

Designation	Sound in- sulation rating R <sub>w,c</sub>	Air de- livery m³/h	Air flow m³/h m²		
			Pressure difference 4 Pa	10 Pa	20 Pa
Z 100	34	70	25	40	70
Z2B 101	36	70	15	22	35
ZB, ZE, ZU 101	41	70			
ZB, ZE, ZU 102	37	107			

\* Measured values for models in 30° installation in glazing rebates  
 (R<sub>w,c</sub> (incl. frame) = 30 dB)

### Models 100 V

Designation	Sound in- sulation rating R <sub>w,c</sub>	Air de- livery m³/h	Air flow m³/h m²		
			Pressure difference 4 Pa	10 Pa	20 Pa
Z 100 V	42	70	15	22	33
Z2B 101 V	38	50	15	22	30
ZB, ZE, ZU 101 V	43	50			
ZB, ZE, ZU 102 V	42	100			

\* Measured values for models in 30° installation in glazing rebates  
 (R<sub>w,c</sub> (incl. frame) = 30 dB)

### Models 150

Designation	Sound in- sulation rating R <sub>w,c</sub>	Air de- livery m³/h	Air flow m³/h m²		
			Pressure difference 4 Pa	10 Pa	20 Pa
Z 150	38	150	87	98	118
Z2B 151	37	150	94	62	97
ZB, ZE 151	40	150			
ZB, ZE 152	40	240			

\* Measured values for models in 30° installation in glazing rebates P 250  
 and P 300 rebates

### Models 160 V

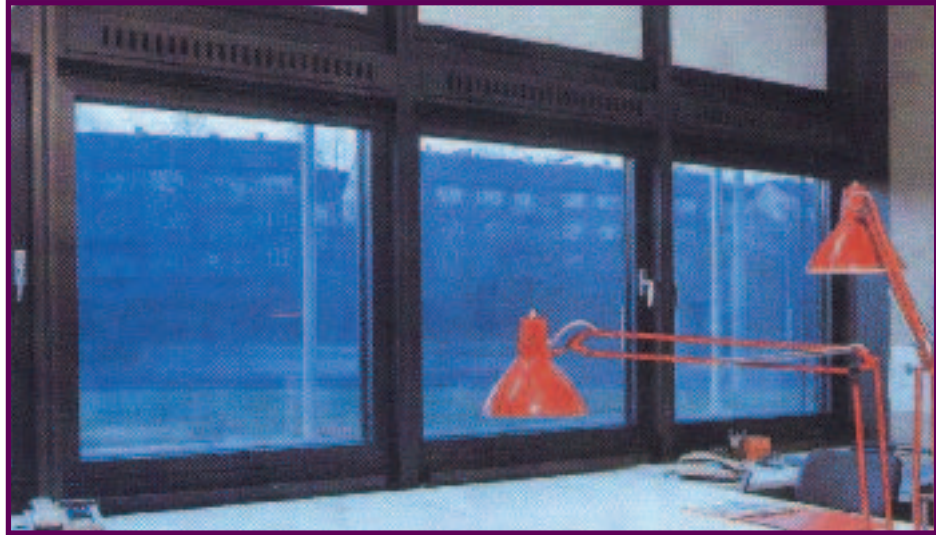
Designation	Sound in- sulation rating R <sub>w,c</sub>	Air de- livery m³/h	Air flow m³/h m²		
			Pressure difference 4 Pa	10 Pa	20 Pa
Z 160 V	43	70	4	6	6
Z2B 161 V	41	120	11	22	34
ZB, ZE 161 V	41	120			
ZB, ZE 162 V	38	240			

\* Measured values for models with weatherguard profile P 250  
 and P 300 rebates

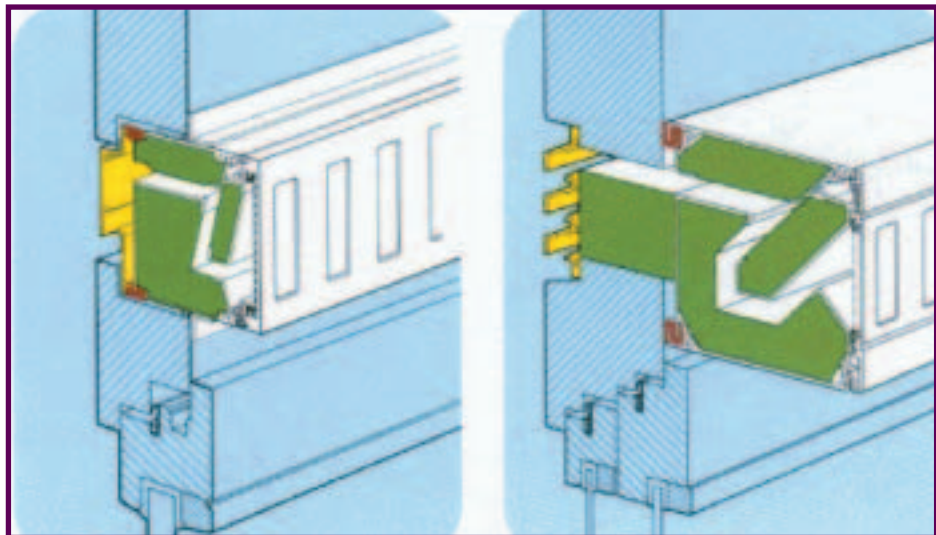
### Specification of models 100

Z 100	– Ventilation without fan
Z2B 101	– Ventilation without fan with fan control in the box
ZB 101, ZB 102	– Ventilation with 1 or 2 fans, automatic
ZE 101, ZE 102	– Ventilation with 1 or 2 fans, de-activation
ZU 101, ZU 102	– Ventilation with 1 or 2 fans, remote fan

תרשים 12.19 - שילוב מאוורר אקוסטי בחלון אלומיניום



תרשים 12.20 - שילוב מאוורר אקוסטי בחלון עץ או במעטפת המבנה



כושר הבידוד האקוסטי של קיר בשילוב חלון מחושב לפי הנוסחה:

$$R_{tot} = -10 \lg \left[ \frac{S_1}{S_1 + S_2} \cdot 10^{-0.1R_1} + \frac{S_2}{S_1 + S_2} \cdot 10^{-0.1R_2} \right], dB$$

כאשר:

$R_1, R_2$  - כושר הבידוד האקוסטי של מרכיבי האלמנט המשולב

$R_{tot}$  - כושר הבידוד האקוסטי של האלמנט המשולב

$S_1, S_2$  - שטחים של מרכיבי האלמנט המשולב

כאשר כושר הבידוד האקוסטי של אחד המרכיבים גבוה ב-15 dB לפחות ( $R_1 - R_2 \geq 15 \text{ dB}$ ), ניתן לחשב את כושר הבידוד הכולל באמצעות הנוסחה:

$$R_{tot} = R_2 + 10 \lg \left[ \frac{S_2}{S_1 + S_2} \right]$$

בתרשים 12.21 מוצגות נומוגרמות לקביעת כושר בידוד אקוסטי של אלמנט משולב קיר + חלון.

דוגמה לקביעת כושר בידוד אקוסטי של קיר + חלון:

נתון: קיר בשטח  $S_1 = 10 \text{ m}^2$ , בעל כושר בידוד אקוסטי של  $R_1 = 50 \text{ dB}$   
 חלון בשטח  $S_2 = 2 \text{ m}^2$ , בעל כושר בידוד אקוסטי של  $R_2 = 25 \text{ dB}$

שלב א' - מחשבים את יחס השטחים:

$$\frac{S_0}{S_1} = \frac{12}{2} = 6$$

שלב ב' - מחשבים את ההפרש:

$$R = R_1 - R_2 = 50 - 25 = 25 \text{ dB}$$

שלב ג' - על פי הנומוגרמות בתרשים 12.21 קובעים את שיעור הורדת כושר הבידוד האקוסטי:

$$\delta R = 17 \text{ dB}$$

שלב ד' - קובעים את כושר הבידוד האקוסטי של השילוב קיר + חלון:

$$R_{tot} = 50 - 17 = 33 \text{ dB}$$

האטימה היא נקודת התורפה של חלונות. האטימה משפיעה במידה רבה על כושר הבידוד האקוסטי וגורמת להורדת כושר הבידוד האקוסטי הכולל של המעטפת.

את כושר הבידוד הממוצע של שמשה מקשית ניתן להעריך לפי הנוסחה:

$$R = 10.5 \lg h + 19.3, \text{ dB } (\pm 3 \text{ dB})$$

כאשר:  $h$  - עובי השמשה במ"מ

כושר הבידוד של השמשות מושפע גם מזווית הפגיעה של גל הקול - ראה תרשים 12.23. מתרשים זה ניתן ללמוד שכושר הבידוד האקוסטי של שמשה בעובי 4 מ"מ יורד בשיעור של 9 dB, כאשר זווית פגיעת גלי הקול משתנה מ-0° עד ל-70°. שינוי זה משמעותי ביותר בהתחשב בכושר הבידוד האקוסטי הנמוך של חלונות אלה. עובדה זו מסבירה את מפלסי רעש התחברה הגבוהים גם בקומות העליונות של המבנים.

כושר הבידוד האקוסטי של חלונות כפולים תלוי בעובי השמשות, בגודל מרווח האוויר ובכושר הבליעה של החומרים המורכבים במרווח האוויר, וזאת בדומה לתכונות האקוסטיות של מחיצות כפולות.

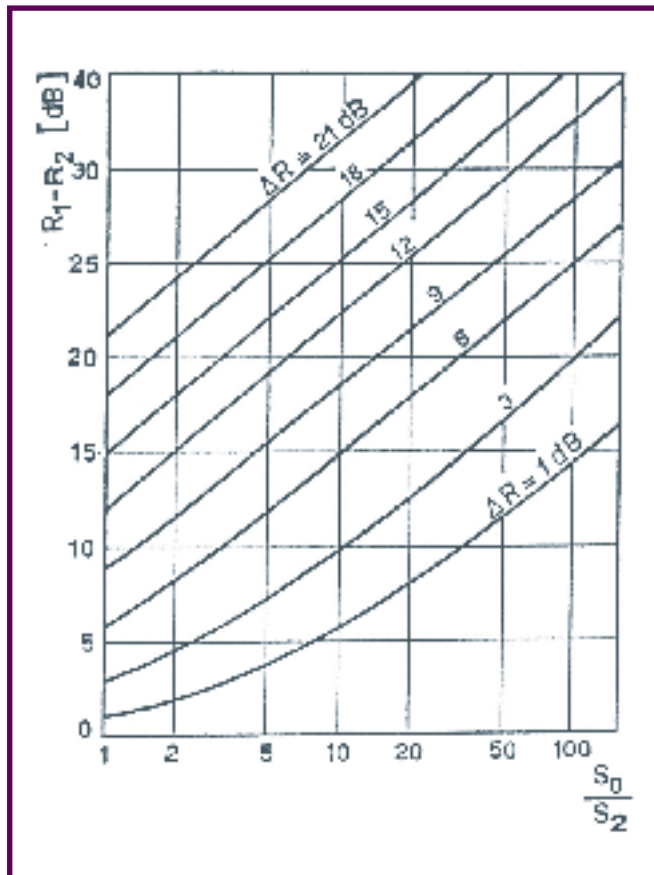
השפעת עובי השמשות על כושר הבידוד של החלון הכפול מוצגת בתרשים 12.24.

שימוש בשמשות זהות בעובי 8 מ"מ גורם לתופעת התהודה של המערכת שמשה - מרווח האוויר - שמשה, הגורמת לירידה דרסטית של כושר הבידוד בתחום התדירויות (1,000 ÷ 2,000) Hz.

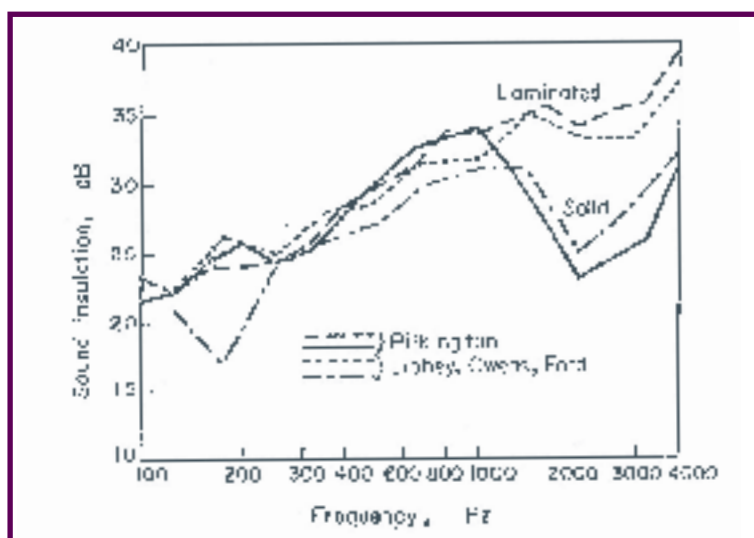
החלפת השמשות לשמשות 4 מ"מ ו-12 מ"מ (המסה הכוללת נשמרת), פותרת את הבעיה הני"ל.

בטבלה 12.4 מוצגים ערכי כושר הבידוד האקוסטי של חלונות.

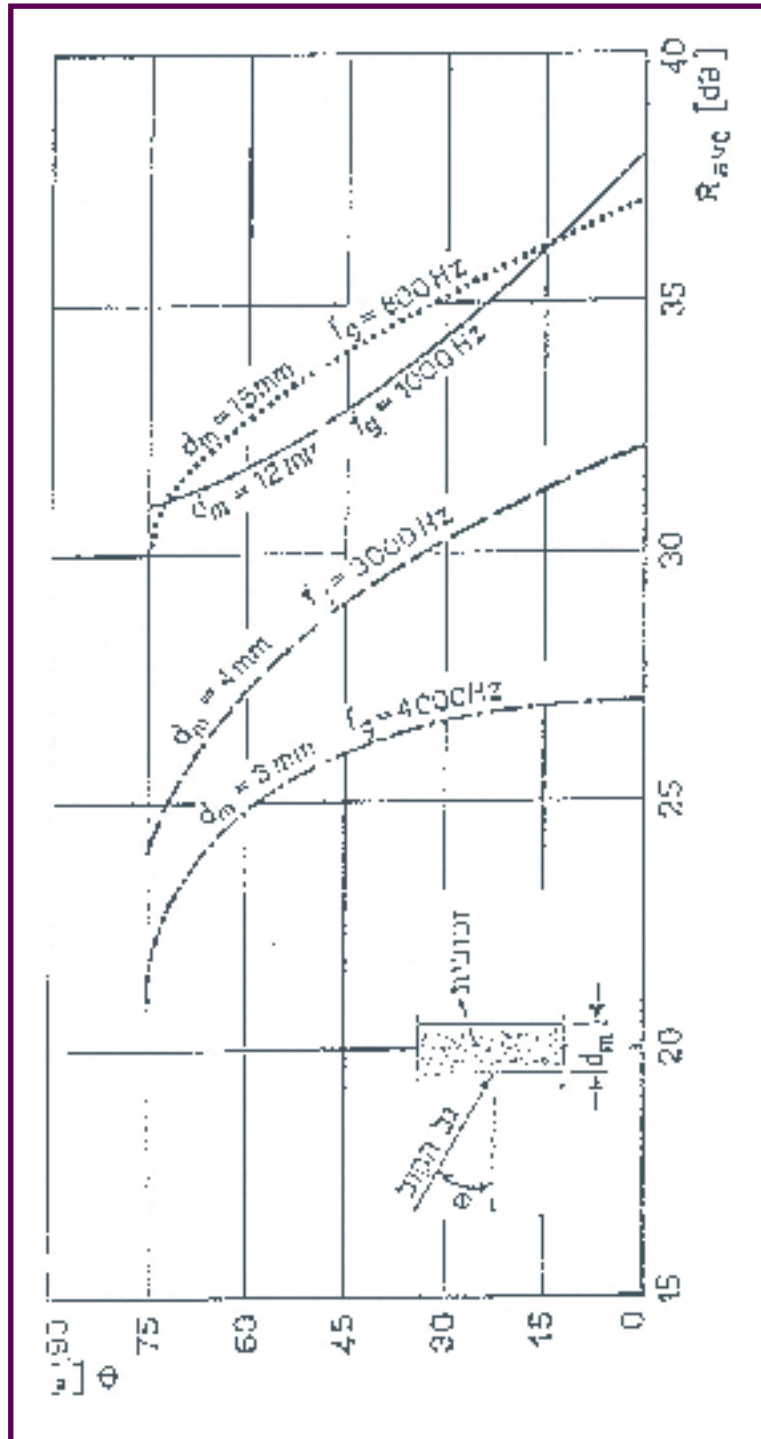
תרשים 12.21 - נמוגרמות לקביעת כושר בידוד אקוסטי של אלמנט משולב קיר+חלון



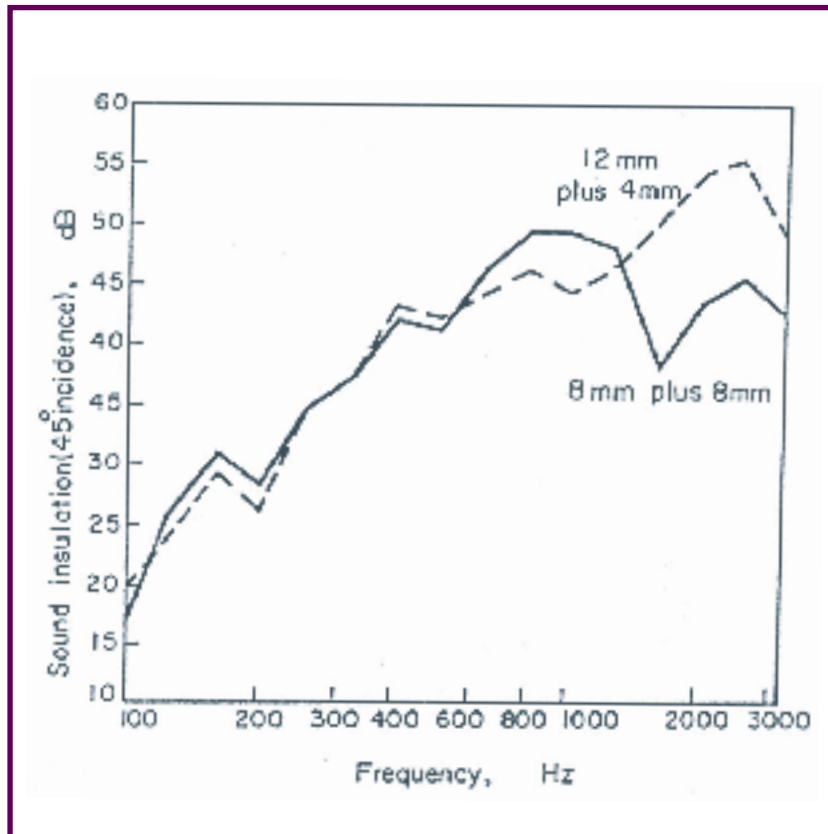
תרשים 12.22 - תכונות בידוד אקוסטי של שמשות



תרשים 12.23 - השפעת זווית פגיעת גל הקול על כושר הבידוד האקוסטי של שמה



תרשים 12.24 - השפעת עובי השמשות על כושר הבידוד של החלון הכפול



טבלה 12.3 – בידוד אקוסטי של קירות מטויחים בטיח 1.5 ס"מ מכל צד

אינדקס בידוד, dB, I <sub>a</sub>	מסה שטחית ק"ג למ"ר	תאור הקיר
47	180	קיר מבטון מקשי בעובי 7.5 ס"מ
53	360	קיר מבטון מזוין מקשי בעובי 15 ס"מ
38	154	קיר מבלוקי בטון חלולים בעובי 7 ס"מ
42	168	קיר מבלוקי בטון חלולים בעובי 10 ס"מ
47	260	קיר מבלוקי בטון חלולים בעובי 15 ס"מ
50	300	קיר מבלוקי בטון חלולים בעובי 20 ס"מ
39	94	קיר איטונג 570 ק"ג לממ"ק בעובי 7 ס"מ
44	111	קיר איטונג 570 ק"ג לממ"ק בעובי 10 ס"מ
45	168	קיר פנים מאיטונג 570 ק"ג לממ"ק בעובי 20 ס"מ
51	192	קיר חוץ מאיטונג 570 ק"ג לממ"ק בעובי 20 ס"מ עם הרבצת בטון בעובי 0.5 ס"מ מכל צד
40	130	קיר מבלוקי גבס בעובי 10 ס"מ ללא טיח
42	120	קיר מבלוקי סיליקט מקשי בעובי 7 ס"מ
46	190	קיר מבלוקי סיליקט מקשי בעובי 10 ס"מ
50	285	קיר מבלוקי סיליקט מקשי בעובי 15 ס"מ
53	430	קיר מבלוקי סיליקט מקשי בעובי 20 ס"מ

## טבלה 12.4 – כושר בידוד אקוסטי של חלונות

אינקס בידוד Rw ,dB	תיאור
15	חלון הזזה מאלומיניום עם ארגו תריס, התריס מורד, החלון סגור
18	חלון הזזה מאלומיניום ללא ארגו תריס, החלון סגור
19	חלון הזזה מאלומיניום ללא ארגו
19	חלון סבב מעץ ללא ארגו תריס, החלון סגור
22	חלון צירי מאלומיניום, 6 מ"מ, ללא אטימה
25	חלון צירי מאלומיניום, עובי הזכוכית 4 מ"מ, כולל אטימת המסגרת
26	כני"ל, עם בידודית 4+6+4 מ"מ
29	חלון צירי מאלומיניום, עובי הזכוכית 6 מ"מ, כולל אטימת המסגרת
29	חלון עם שתי שמשות במסגרת אחת, השמשות בעובי 3 מ"מ, כולל מרווח אוויר בשיעור 12 מ"מ
33	כני"ל, עם זכוכית משוריינת 3+3 מ"מ
33	כני"ל, עם בידודית 6+12+4 מ"מ
34	כני"ל, עם בידודית 5+8+3 מ"מ
34	כני"ל 4+4 מ"מ
36	כני"ל 5+5 מ"מ
	כני"ל 6+6 מ"מ
38	חלון כפול עם שתי שמשות במסגרת אחת, השמשות בעובי 3 מ"מ, 2 מ"מ, במסגרות נפרדות, מרווח אוויר - 15 מ"מ.
40	כני"ל 8+8 מ"מ
41	חלון כפול עם שתי שמשות בעובי 6 מ"מ כל אחת, במסגרות נפרדות, מרווח האוויר 100 מ"מ.
54	חלון כפול עם שתי שמשות בעובי 6 מ"מ ובעובי 9 מ"מ, מרווח האוויר 200 מ"מ, קיים שיכוד קצוות.

# 13. מראי מקום

1. Wilson A. "Noise". Her Majesty's Stationary Office, London, 1963.  
2. "הנדסת תעבורה - עקרונות ותכ"ן", ד. בלשה, ש. הקרט, 1992.
3. Tetlow D. Truck tyre noise, General Motors Proving Ground, Milford, Michigan Report, 1968.
4. Gordon C.G.,...Guide for Highway Engineers, Highway Research Board, 1971.
5. Gilbert. D. "Noise from Road Traffic (Interrupted Flow)". Journal of Sound and Vibration, 51 (2), 1975.
6. Fisk. D.J. "Prediction of Urban Noise".  
Smith. G.C.& Eight International Congress on Filon. F. Acoustics, London, 1974.
7. Burgess. M.A. "Noise Prediction for Urban Traffic Conditions - Related to Measurements in the Sydney Metropolitan Area".  
Journal of Applied Acoustics Vol.10, No.1, 1977.
8. י. קלר, חקר רעש תחבורה והשלכותיו על תכנון אקוסטי של בתי מגורים. חיבור לקבלת תואר מוגיטר, טכניון, 1979.
9. Stephenson, R.J.& "Traffic Noise", Journal of Sound and Vibration, 7(2), 1968.
10. Bure, V. "Noise Abatement". International Symposium, Brussels, 1967.
11. Johnson, D.R., Sounders, E.G, The evaluation of noise from freely flowing road traffic, JSV, 7, 2, 1968.
12. "Review of Road Traffic Noise". Road Research Laboratory Report LR357, 1970.
13. י. קלר, תכונות אקוסטיות של צמחייה בישראל - דוח מחקר טכניון, 1977.
14. קריטריונים לרעש מדריכים - הוועדה הבין-משרדית לקביעת תקני רעש מכבישים - 1999.
15. Kyoji Fujiwara and Naotuki Furuta.  
Sound Shielding Efficiency of a Barrier with a Cylinder at the Edge, Noise Control Engineering Journal, pp. 5-11, 1991.
16. European Standard ptEN 1793 part 1, 2, 3, 1995 - Road traffic noise reducing devices - test method for determining the acoustic performance.  
Part 1 - Intrinsic characteristics - sound absorption  
Part 2 - Intrinsic characteristics - airborne sound insulation  
Part 3 - Normalized traffic noise spectrum